Forschungsbericht

Untersuchung von Sprinklerkonzepten zum Schutz von Lagersituationen mit Lithium-Ionen Batterien

Version: 1.3
Stand: 25.11.2015

Erstellt durch:
VdS Schadenverhütung GmbH
Brandschutz Produktmanagement
Amsterdamer Str. 172
D-50735 Köln
Tel: +49 221-7766-200 • Fax: +49 221-7766-308
www.vds.de

Auftraggeber:
GDV – Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
Wilhelmstr. 43 /43 G
D-10117 Berlin

Ansprechpartner:
Herr Stefan Kratzmeir
Tel: +49 221-7766-161
SKratzmeir@vds.de

Ansprechpartner:
Herr Marco van Lier
Tel: +49 030 2020-5355
m.van.lier@gdv.de

Revisionsindex

Rev	Inhalt	Datum	Name
1.0	Erstellung des Forschungsberichts	26.09.14	Bm
1.1	Überarbeitung und Ergänzungen in diversen Kapiteln	12.11.14	Ktr
1.2	Überarbeitung des Fazit	28.01.15	Ktr
1.3	Div. Überarbeitungen auf Vorschlag des GDV (BEB)	25.11.15	Ktr

Der Inhalt dieses Dokumentes ist urheberrechtlich geschützt. Kopieren, auch auszugsweise, ist nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung durch VdS Schadenverhütung GmbH gestattet.

VdS Schadenverhütung GmbH
Amsterdamer Str. 174 • 50735 Köln
Tel.: (0221) 7766-0 • Fax: (0221) 7766-341
Ein Unternehmen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV)
VdS und das VdS-Logo sind geschützte Marken

Geschäftsführer:
MBA & Eng. Robert Reinermann
HRB 28788 Amtsgericht Köln

Commerzbank AG Köln • Konto 11 00 130 (BLZ 370 400 44)
Sparkasse KölnBonn • Konto 165 2957 (BLZ 370 501 98)
Postbank Köln • Konto 1226 27-500 (BLZ 370 100 50)
USt. Id. Nr.: DE190145687

Inhalt

1 Einführung 1
1.1 Auftraggeber 1
1.2 Ausgangslage 1
1.3 Aufgabenstellung 1
2 Grundlagen 2
2.1 Lithium-Ionen Akkus 2
2.2 Lagerung und Transport 2
3 Vorversuche 3
3.1 Einzelne Akkumulatoren 3
3.2 Mehrere Akkumulatoren 3
3.3 Erkenntnisse 4
4 Brandversuche mit Sprinkleranlage 4
4.1 Brandlasten 4
4.1.1 Lithium-Ionen Akkus 4
4.1.2 Verpackung und Form der Brandlast 5
4.1.3 Zündquelle 6
4.2 Versuchsszenarien 7
4.2.1 Brandhaus 7
4.2.2 Blocklagerung 8
4.2.2.1 Aufbau 8
4.2.2.2 Sprinkleranlage 9
4.2.2.3 Ablauf 10
4.2.3 Regallagerung 10
4.2.3.1 Aufbau 10
4.2.3.2 Sprinkleranlage 11
4.2.3.3 Ablauf 12
4.3 Versuchsdurchführung 12
4.3.1 Versuch 1: Blocklager – Akkumulatoren mit Gehäuse 13
4.3.1.1 Ablauf 13
4.3.1.2 Messdaten 15
4.3.1.3 Beobachtungen 15
4.3.2 Versuch 2: Blocklager – Akkumulatoren ohne Gehäuse, diagonal 16
4.3.2.1 Ablauf 16

4.3.2.2 Messdaten 18
4.3.2.3 Beobachtungen 18
4.3.3 Versuch 3: Blocklager – Akkumulatoren ohne Gehäuse an Innenkanten 19
4.3.3.1 Ablauf 19
4.3.3.2 Messdaten 22
4.3.3.3 Beobachtungen 22
4.3.4 Versuch 4: Regallager – Akkumulatoren mit Gehäuse 23
4.3.4.1 Ablauf 23
4.3.4.2 Messdaten 25
4.3.4.3 Beobachtungen 25
4.3.5 Versuch 5: Regallager – Akkumulatoren ohne Gehäuse 26
4.3.5.1 Ablauf 26
4.3.5.2 Messdaten 28
4.3.5.3 Beobachtungen 29
4.3.6 Versuch 6: Regallager – Akkumulatoren ohne Gehäuse, Zündung vorn 29
4.3.6.1 Ablauf 29
4.3.6.2 Messdaten 33
4.3.6.3 Beobachtungen 33
5 Auswertung 34
5.1 Brandverlauf und Brandschaden 34
5.2 Film- und Fotoaufnahmen 34
6 Bewertung in Bezug auf die Wirksamkeit von Sprinklerkonzepten 34
7 Zusammenfassung und Fazit 36
Anhang A – Fotos .....
Anhang B – Messdaten .....
Anhang C – Beschreibung der Messgeräte .....

1 Einführung

1.1 Auftraggeber

VdS Schadenverhütung GmbH (VdS) wurde durch den Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) beauftragt, verschiedene Sprinklerkonzepte für Lagersituationen im Rahmen von Brandversuchen zu untersuchen.

Von der Seite des GDV wurde die Arbeit durch die Kommission Sachversicherung-Schadenverhütung (KSSV) und deren Projektgruppe Lithium-Ionen (PG Lion) begleitet.

1.2 Ausgangslage

Ob nun durch medienwirksame Ereignisse, wie dem Brand der Batterien des Boeing Dreamliners, Meldungen über in Brand geratende Akkus von Mobiltelefonen oder Laptops oder aber über Berichte von Bränden in Lagersituationen unter Beteiligung von Akkus, die Frage nach wirksamen und sinnvollen Schutzkonzepten für die Lagerung von Geräten mit Lithium-Ionen Batterien kann derzeit noch nicht umfänglich beantwortet werden.

Es gibt einzelne Versuche, z.B. mit Batterien für Elektrofahrzeuge, bei denen die Brandbekämpfung bei brennenden Akkus ausprobiert wurde[1]. Hier ergeben sich bereits einige Hinweise, dass Wasser als Medium zur Brandbekämpfung grundsätzlich geeignet ist und eine hohe Kühlwirkung benötigt wird.

Der amerikanische Versicherer FM Global hat Brandversuche für die Regallagerung von bestimmten Typen von Lithium-Ionen-Akkus durchgeführt. Auch hier ist die grundsätzliche Eignung von Sprinkleranlagen für diese Risiken, natürlich nur unter bestimmten und sehr begrenzten Rahmenparametern, bestätigt worden.[2]

Bisher gibt es jedoch noch keine allgemeingültigen Aussagen, wie insbesondere Lagerbereiche wirkungsvoll und sinnvoll geschützt werden können. Dabei kommt dieser Akku-Typ nicht nur in großer Form, z.B. bei Elektrofahrzeugen, sondern viel häufiger in kleineren Anwendungen, wie z.B. bei Elektrofahrrädern, Werkzeugen oder Laptops zum Einsatz. Neben der Sicherheit beim Transport stellt sich auch die Frage, wie normale Lagerbereiche, z.B. in Verteilerzentren oder bei Versandgroßhändlern, geschützt werden können.

1.3 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung umfasst die Untersuchung der grundsätzlichen Eignung von Sprinkleranlagen zum Schutz von Lagerbereichen, die Lithium-Ionen-Akkus enthalten können.

Dabei sollen möglichst vorhandene Schutzkonzepte von Sprinkleranlagen gemäß VdS CEA 4001 auf die Übertragbarkeit zu den beschriebenen Risiken hin untersucht werden.

Es werden nur Brandereignisse untersucht, die von außen auf einen Akku einwirken. Brandereignisse, die auf einer Selbstentzündung, z.B. durch mechanische Beschädigung oder aufgrund eines technischen Defekts basieren, werden nicht untersucht.

Es werden Regallager und Blocklager untersucht. Die Untersuchungen werden dabei ausschließlich auf normale Lagerbereiche begrenzt. D.h. auch wenn Ergebnisse möglicher-

---

[1] ENGELHAAF, Markus; KRESS, David; RICHTER, Andreas: Lithium-Ionen-Akkus Löschen. In: Mobility 2.0 Kompendium 2013/2014. S.65

[2] DITCH Benjamin; DE VRIES, Jaap: Flammability characterization of Lithium-ion Batteries in Bulk storage. 2013. FM Global.

weise teilweise übertragbar sind, so sind Produktionsbereiche von Lithium-Ionen-Akkus oder deren ausschließliche Lagerung nicht erfasst.

Weiterhin muss angemerkt werden, dass durch die benötigte große Anzahl von Lithium-Ionen-Akkus erhebliche Kosten entstehen. Für die Brandversuche wurden Akkus eines bestimmten Typs zur Verfügung gestellt. Daher sind Aussagen auch nur darauf beschränkt.

Die Versuche wurden gemäß dem Konzept „Versuchskonzept - Überprüfung von Auslegungskriterien von Sprinkleranlagen bei Lagerung von Li-Ionen Batterien“ vom 19.12.2013 durchgeführt. Dieses Konzept wurde mit der PG Li-Ionen der KSSV abgestimmt.

2 Grundlagen

2.1 Lithium-Ionen Akkus

Der Oberbegriff Lithium-Ionen-Akkus beschreibt Akkumulatoren, in welchen die elektrische Energie in einem chemischen Prozess mit Stoffänderung gespeichert wird. Die Lithium-Ionen-Zellen bestehen aus einer negativen Grafit-Elektrode und einer positiven Lithium-Metalloxid-Elektrode. Für das Metalloxid werden je nach Hersteller und Akku-Typ verschiedene Stoffe genutzt, gängig sind z.B. Mangan, Nickel und Kobalt. Beim Ladevorgang werden Lithium-Ionen zur negativen Elektrode transportiert und dort im Kohlenstoffgitter eingelagert, beim Entladen kehrt sich dieser Prozess um und die Ionen wandern zurück zur positiven Elektrode. Der Elektrolyt als Transportmedium nimmt an der Reaktion nicht teil.

Die Vorteile von Lithium-Ionen-Akkumulatoren verglichen mit anderen Akkumulatoren sind höhere Zellspannungen verbunden mit einem hohen Wirkungsgrad ohne Auftreten eines Memory-Effekts.

2.2 Lagerung und Transport

Neben den üblichen gesetzlichen Bestimmungen, wie z.B. dem Arbeitsschutzgesetz oder der Betriebssicherheitsverordnung gibt es derzeit darüber hinaus keine verpflichtenden Anforderungen an die Lagerung von Lithium-Ionen-Akkus.

Das GDV Merkblatt zur Schadenverhütung „Lithium Batterien“ gibt Hinweise für eine mögliche Lagerung und Sicherheitsvorkehrungen solcher Akkus[3].

Der Transport von Lithium-Ionen-Akkus unterliegt jedoch dem Gefahrgutrecht. Neben einer Reihe von Untersuchungen an den Akkus selber, wie z.B. Unempfindlichkeit gegen Vibration, Stoß oder thermische Belastung, müssen diese als Gefahrgut der Klasse 9 (UN 3480): wieder aufladbare Sekundär-Batterien (Lithium-Ionen-Batterien)) behandelt werden.

Es werden spezielle Transportverpackungen vorgeschrieben. Dabei kann es sich z.B. um spezielle Kartons mit einer Baumusterzulassung der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) handeln.

[3] VdS 3103: Lithium Batterien – GDV Merkblatt zur Schadenverhütung. Hrsg: Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

3 Vorversuche

Im Vorfeld der Versuche mit verschiedenen Lagersituationen wurden Versuche mit einzelnen Akkus durchgeführt um abschätzen zu können, in welcher Art die Lithium-Ionen-Akkus im Brandverlauf reagieren. Anhand dieser orientierenden Vorversuche wurde das bereits zitierte Versuchskonzept erstellt.

3.1 Einzelne Akkumulatoren

Für diese Abschätzung wurden zuerst einzelne Akkus auf ihre Reaktion auf direkte Beflammung geprüft. Ein aus einem Akkupack entferntes Bündel Lithium-Ionen-Zellen wurde dazu über einer Heptan-Wanne mit einem Lötbrenner beflammt. Bereits ca. nach 50 s fand das erste Abblassen eines brennenden Gasgemisches aus den Zellen im unmittelbaren Bereich des Lötbrenners heraus statt. Nach einer weiteren Minute sprühten brennende Gase und Funken mit einer Höhe von ca. 20 cm ca. 5 s lang aus einer der Zellen heraus. Dieser Vorgang wiederholte sich ca. 30 s später, als die zweite Zelle reagierte. Danach wurde der Lötbrenner entfernt und die Zellen brannten eigenständig weiter, mit weiterem Abblasen brennbarer Gase und der Reaktionen anderer Zellen.

Danach wurde ein Akku in seinem Gehäuse liegend in einer Brandwanne den Flammen einer brennenden n-Heptan-Wanne ausgesetzt. Nach ca. 7 Minuten war das Heptan vollständig verbrannt, und die beiden Kunststoffenden des Akkus brannten mit kleinen Flammen. Erst 8:40 Minuten nach der Zündung der Wanne reagierte der Akku und an beiden Enden des Gehäuses wurden brennende Gase abgeblasen, teilweise waren Funken zu sehen, wie in Abbildung 51 erkennbar. Ähnlich verhielt es sich bei der Beflammung eines stehenden Akkus mit abmontierten Enden: nach ca. 7 Minuten unmittelbar in den Flammen reagierten die Zellen und bliesen immer wieder brennbares Gas ab. Nach 8:40 Minuten erfolgte eine so starke Reaktion, dass der stehend über der Wanne angebrachte Akku aus seiner in Abbildung 52 dargestellten Halterung sprang.

3.2 Mehrere Akkumulatoren

Auf die Einzelversuche folgten Versuche mit einer größeren Anzahl Akkumulatoren. Zunächst wurden drei Akkus mit Gehäuse und unbekannter Ladung liegend über einer Brandwanne mit n-Heptan beflammt. Nach 8:20 Minuten erlosch die Zündquelle und lediglich die Kunststoffenden der Akkus brannten weiter, bis auch diese ca. 19 Minuten nach der Zündung verloschen.

Als letzter Vorversuch wurde ein Karton mit 8 geladenen Akkus (mit Gehäuse) auf einem Gitter über einer Brandwanne mit n-Heptan positioniert und 2 Target-Kartons daneben und darauf platziert. Zunächst brannten die Umkartons, nach ca. 18 Minuten waren die Targets fast vollständig verbrannt und der Akkukarton kippte zur Seite um. Bald brannten ausschließlich die Kunststoffendstücke der Akkus. 23 Minuten nach der Zündung begannen die Reaktionen der Akkus: mit kurzen Zeitabständen wurden brennende Gase aus den verschiedenen Zellen abgeblasen. Das Feuer brannte weitere 13 Minuten mit einer ungefähr konstanten Größe und Intensität weiter, bis es schließlich mit einem Wasserschlauch gelöscht wurde.

3.3 Erkenntnisse

Anhand der orientierenden Vorversuche wurde deutlich, dass die Hülle einen wesentlichen Einfluss auf das Brandverhalten, insbesondere auf die Reaktionszeit der Akkus hat. Daher wurde in Abstimmung mit dem GDV entschieden, dass in den Brandversuchen sowohl Akkus mit und ohne Gehäuse verwendet werden sollen.

4 Brandversuche mit Sprinkleranlage

4.1 Brandlasten

4.1.1 Lithium-Ionen Akkus

Als Brandlasten kommen unterschiedliche Bauarten von handelsüblichen Akkus für Elektrofahrräder zum Einsatz. Diese bestehen, je nach Ausführung, in der Regel aus 30 – 50 einzelnen ICR 18650 Zellen.

Die Akkus stammen aus Rückläufern aus diversen Gründen, wie z.B. Garantiefälle, Wasserschäden oder kleinere äußere Beschädigungen.

Die hier verwendeten Akkupakete werden in einer Aluminiumhülle verbaut und haben an beiden Enden Kunststoffverschlüsse mit Steckern und Platinen. Andere handelsübliche Akkupakete sind auch in Hüllen aus Kunststoff erhältlich. Diese sind dann vom Prinzip gleich aufgebaut, jedoch ist der Kunststoffanteil dann etwas höher.

In den Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Aluminiumhülle einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit und das Brand- und Reaktionsverhalten hat. Die Versuche wurden mit Akkus mit und ohne Aluminiumhülle durchgeführt.

Üblicherweise werden die Akkus mit 50-70% der maximalen Ladungskapazität gelagert. Da es sich bei den verwendeten Akkus um gebrauchte Ware handelte, wurden stichprobenartig Messungen durchgeführt.

Der Ladungszustand der Akkupakete beträgt bei mindestens 80% mindestens 37 Volt. Dies entspricht einer Ladung von ca. 50%.



Abbildung 1: Handelsüblicher Akku für Elektrofahrräder



Abbildung 2: Innenleben eines Akkus für Elektrofahrräder.

Die Akkupakete (mit und ohne Aluminiumhülle) werden in BAM-zugelassenen Kartons verpackt. Dabei sind die einzelnen Akkupakete in spezielle Kartons verpackt und jeweils 8 Akkupakete in einem weiterem Umkarton.

Dies entspricht einer normalen Transportsituation. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei den hier betrachteten Lagerarten die Transportverpackung auch als Lagerverpackung verwendet wird.

4.1.2 Verpackung und Form der Brandlast

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, müssen Lithium-Ionen-Akkus in einer speziellen Verpackung transportiert werden. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass diese Verpackung auch in solchen Lagersituationen vorhanden ist, die im Rahmen der Brandversuche untersucht werden sollen. Daher wurde als Verpackung die Transportverpackung der Fahrrad-Akkus gewählt. Sie besteht aus einem Außenkarton in den jeweils 8 Innenkartons verpackt sind. Beide Kartons haben eine Baumusterzulassung der BAM.

Um typische Lagersituationen zu untersuchen, wurden jeweils 12 Kartons auf eine Europalette gepackt und mit einigen Bahnen Verpackungsfolie aus PE umwickelt.

Abmessungen des Einzelkartons:

Länge: 45 cm
Breite: 15 cm
Höhe: 10 cm

Abmessung des Umkartons:

Länge: 40 cm
Breite: 30 cm
Höhe: 45 cm

Abmessung der beladenen Palette:

Länge: 120 cm
Breite: 60 cm



Abbildung 3: Karton und Umkarton mit Baumusterzulassung



Abbildung 4: Typische Transportsituation auf einer Palette mit Verpackungsfolie

Höhe: 104 cm

4.1.3 Zündquelle

Als Zündquelle wurde jeweils eine Zündwanne verwendet, welche in Abhängigkeit vom Versuchsszenario mit unterschiedlichen Mengen n-Heptan befüllt wurde.

Abmessungen:	je 0,28 x 0,16 m
Brennstoff:	n-Heptan
Menge [l]:	Versuch 1: 2,0 l Versuch 2: 1,0 l Versuch 3: 1,0 l Versuch 4: 1,5 l Versuch 5: 1,5 l Versuch 6: 2 x 1,5 l
rechn. Leistung [kW]:	Versuch 1-5: 46,32 kW Versuch 6: 124,44 kW



Abbildung 5: Zündquelle Versuch 1 - 3



Abbildung 6: Zündquelle in versuch 4 - 5

Rechn. Brenndauer [mm:ss]:	Versuch 1: 05:00 Versuch 2: 02:30 Versuch 3: 02:30 Versuch 4: 03:48 Versuch 5: 03:48 Versuch 6: 03:48

Tabelle 1: Jeweils verwendete Zündquelle

4.2 Versuchsszenarien

Die Brandversuche wurden gemäß dem im Vorfeld erarbeiteten Versuchskonzept durchgeführt.[4]

4.2.1 Brandhaus

Die Brandversuche werden in der großen Brandhalle beim Institut der Feuerwehr (IdF) in Heyrothsberge durchgeführt.



Abbildung 7: Übersicht IdF LSA



Abbildung 8: Große Brandhalle mit Deckeneinbau

Grundfläche: 17 m x 15 m
Höhe: 20 m

[4] KRATZMEIR, Stefan: Versuchskonzept – Überprüfung der Auslegungskriterien von Sprinkleranlagen bei der Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien. Version 1.0 vom 19.12.2013. VdS Schadenverhütung GmbH

In die Halle ist in der Höhe von 5,5 m eine Decke aus Wellblech mit einer Fläche von ca. 81 m² eingebaut. Die Brandgase können über die Ränder der Decke frei abströmen, so dass damit ein unendlich großer Raum simuliert werden kann.

4.2.2 Blocklagerung

4.2.2.1 *Aufbau*

Das Blocklager besteht aus 4 Europaletten mit den Abmessungen 0,8 m x 1,2 m. Jede dieser Paletten ist mit 12 Kartons bepackt.

Es sind jeweils 2 Palletten ohne Abstand an der kurzen Seite nebeneinander platziert. An der Längsseite wird ein Schacht von 0,15 m zu den beiden anderen Paletten ausgebildet.

Um diese beladenen Palletten herum werden Paletten mit weiteren Kartonagen, welche sogenannte Targets darstellen, mit einem Abstand von ca. 0,15 m zum Lagergut platziert, wie in Abbildung 9 dargestellt.

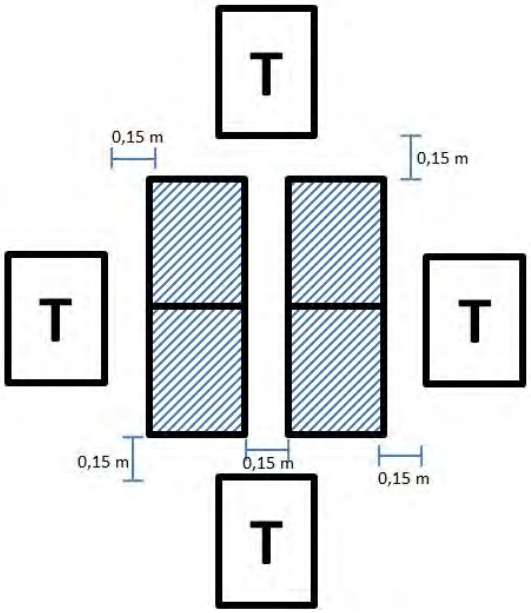


Abbildung 9: Draufsicht Blocklager

Der Versuch mit diesem Aufbau wird zuerst mit verpackten Akkus, die sich in ihrem Aluminiumgehäuse befinden, durchgeführt. Anschließend wird der Versuch mit gleichem Aufbau, allerdings teilweise bestückt mit Kartons, in welchen sich Akkumulatoren ohne Gehäuse befinden, durchgeführt. Abbildung 10 zeigt die Positionierung der Akkus ohne Gehäuse im zweiten Versuch.

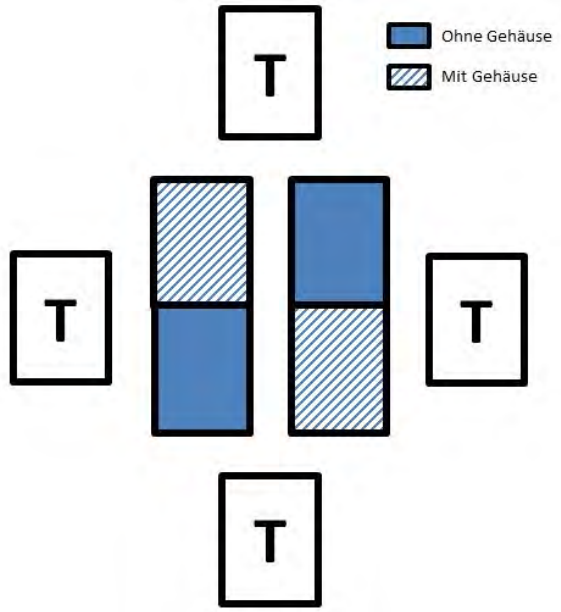


Abbildung 10: Versuchsaufbau mit Akkus ohne Gehäuse

4.2.2.2 *Sprinkleranlage*

Die Auslegung der Sprinkleranlage erfolgt nach den Richtlinien VdS CEA 4001. Das Lagergut wird dabei der Kategorie III (HHS3) zugeordnet. Bei einer Lagerhöhe von ca. 1,20 m wird von einer Mindestwasserbeaufschlagung von 7,5 mm ausgegangen. Abbildung 11 zeigt die Anordnung der Deckensprinkler über dem Blocklager.

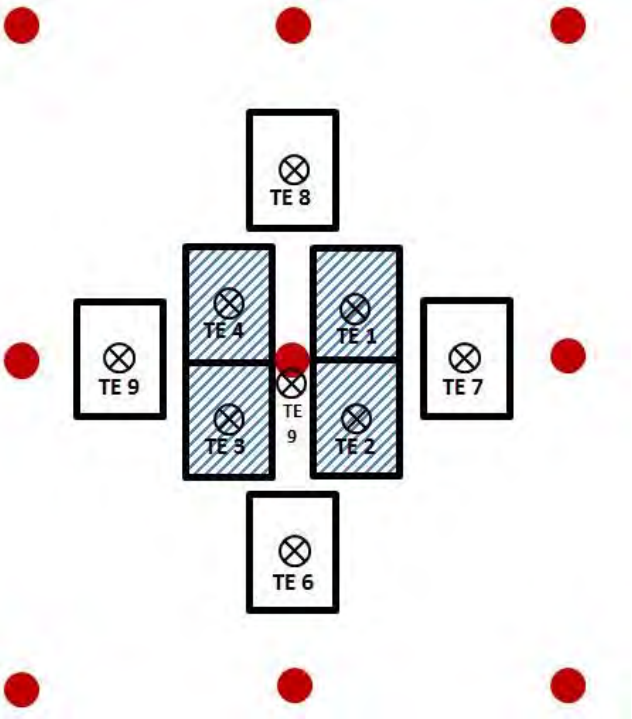


Abbildung 11: Blocklager mit Sprinklerköpfen und Thermoelementen

4.2.2.3 *Ablauf*

Die Zündung dieses Brandszenarios erfolgt wie bereits unter Punkt 4.1.3 beschrieben mittels einer Brandwanne mit n-Heptan. Diese wird mittig im Schacht quer positioniert, sodass die Zündquelle rechts und links leicht unter die Paletten ragt, siehe Abbildung 5. Die genaue Menge n-Heptan und die Brenndauer der Zündquelle ist Tabelle 1 zu entnehmen. Nach der Zündung wird eine Versuchsdauer von mindestens 30 Minuten veranschlagt, je nach Verlauf des Brandgeschehens wird diese Dauer ggf. verkürzt oder verlängert. Auch kann der Brandverlauf dazu führen, dass der Versuch mit einem modifizierten Aufbau wiederholt werden muss, z.B. wenn Zweifel bestehen, dass das Szenario tatsächlich den ungünstigsten Fall nachbildet.

4.2.3 Regallagerung

4.2.3.1 *Aufbau*

Das Regallager besteht aus 24 Europaletten mit den Abmessungen 0,8 m x 1,2 m.

Der Regalaufbau besteht aus zwei Regalzeilen mit jeweils 4 Ebenen. Jede Ebene besteht aus einem Feld mit jeweils 3 Säulen. Die Paletten der mittigen Säule sind mit jeweils 12 Kartons bepackt, während die Paletten in den äußeren Säulen mit jeweils 6 Kartons bepackt sind.

Zwischen dem Lagergut der 3 Säulen wird jeweils ein Schacht von ca. 0,30 m ausgebildet. Die Paletten der beiden Regalzeilen werden in einem Abstand 0,20 m voneinander platziert, wie in Abbildung 12 dargestellt.

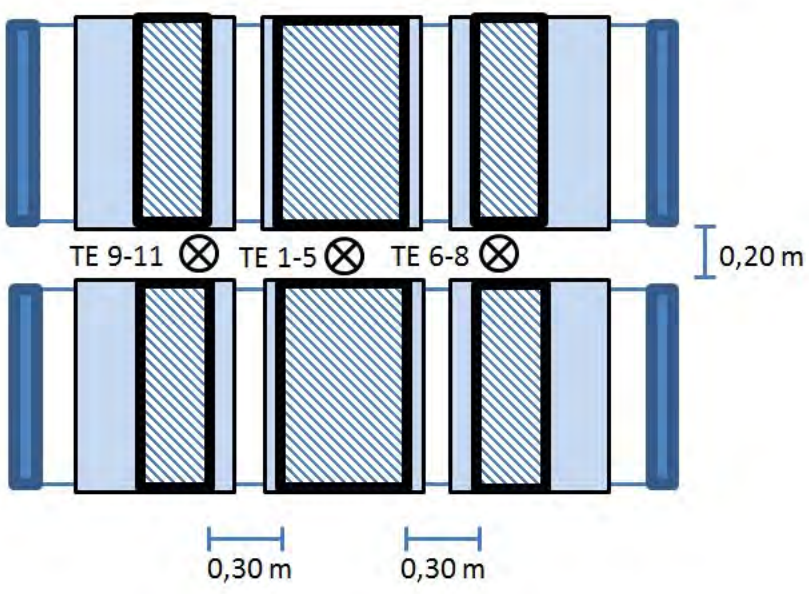


Abbildung 12: Draufsicht Regal mit Thermoelementen

Auch im Regallager folgt auf einen Versuch mit verpackten Akkus in einem Aluminiumgehäuse ein zweiter Versuch mit analogem Aufbau, allerdings bestückt mit verpackten Akkus ohne Gehäuse, siehe Abbildung 13 und Abbildung 14.

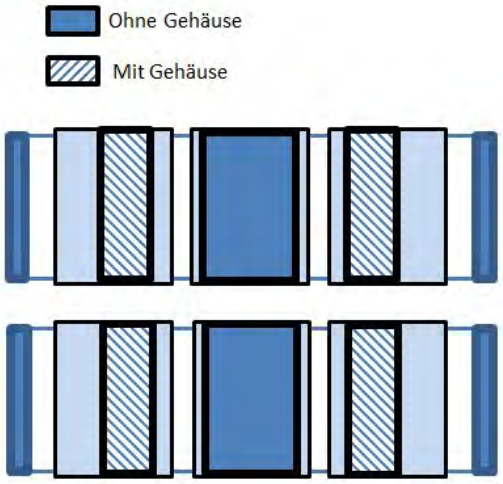


Abbildung 13: Draufsicht, ohne Gehäuse

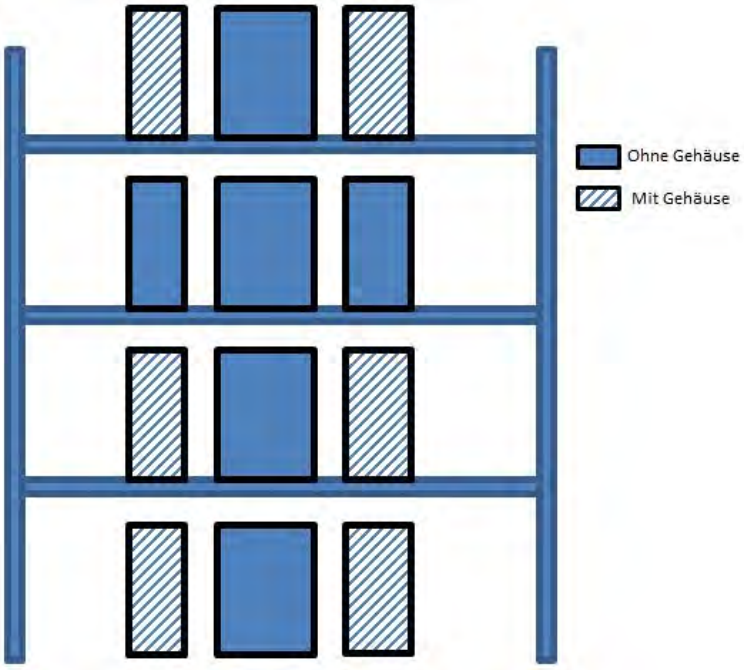


Abbildung 14: Ansicht, ohne Gehäuse

4.2.3.2 *Sprinkleranlage*

Die Auslegung der Regalsprinkler erfolgt nach den Richtlinien der VdS CEA 4001, Abschnitt K.7. Das Lagergut wird der Kategorie III (HHS3) zugeordnet.

Der Lageraufbau wird in diesem Szenario ausschließlich durch Regalschutz geschützt, ein Deckenschutz ist nicht vorhanden. Die Regalsprinkler werden mittig über dem Schacht zwischen den beiden Regalzeilen angeordnet. Dabei befindet sich ein Strangrohr mit Sprinklerköpfen über der zweiten Regalebene, das zweite Strangrohr mir vier Sprinklerköpfen über der vierten Regalebene, wie in Abbildung 15 dargestellt.

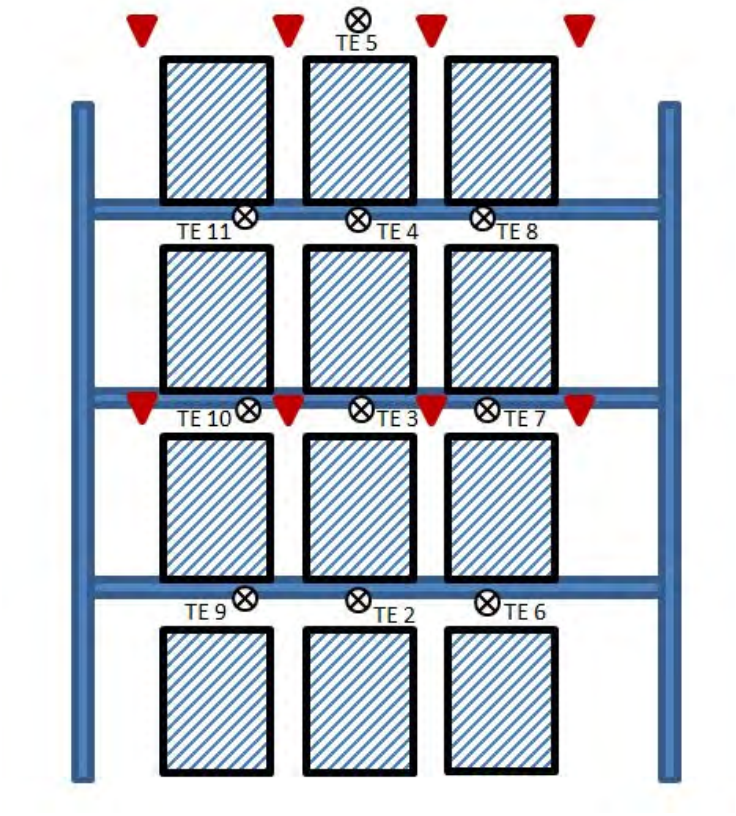


Abbildung 15: Regallager mit Sprinklerköpfen und Thermoelementen

4.2.3.3 *Ablauf*

Die in Absatz 4.1.3 beschriebene Zündquelle wird in diesem Szenario mittig im Schacht zwischen den beiden Regalzeilen und den mittleren Säulen der untersten Ebene platziert, siehe Abbildung 6. Die jeweils verwendete Menge n-Heptan und die Brenndauer der Zündquelle ist Tabelle 1 zu entnehmen. Nach der Zündung wird auch für dieses Brandszenario eine Versuchsdauer von mindestens 30 Minuten veranschlagt, die je nach Verlauf des Brandgeschehens verkürzt oder verlängert werden kann. Der Brandverlauf kann Ausschlag gebend dafür sein, dass der Versuch mit einem modifizierten Aufbau wiederholt wird, um bestmöglich den ungünstigsten Fall zu reproduzieren.

4.3 Versuchsdurchführung

Als Versuchsdauer werden 30 Minuten nach Zündung veranschlagt. Nach Ablauf dieser Zeit wird ein eventuell vorhandener Brand manuell gelöscht um den Brandschaden zu dokumentieren. Nach Ermessen und unter Beachtung des Brandverlaufs kann diese Versuchsdauer verkürzt oder verlängert werden.

4.3.1 Versuch 1: Blocklager – Akkumulatoren mit Gehäuse

4.3.1.1 *Ablauf*

Zeit (mm:ss)	Messzeit Temperatur-kurven (s)	Beobachtung
00:00	504	Zündung
01:00	564	Flammen züngeln bis zu 1 m über der Oberkante des Lager-guts
01:14	578	Sprinkler auf
01:45	609	Kleinere Flamen, ca. 0,5 m über Lagergut
01:14 – 02:14	-	Unstetiger Wasserdruck bis dieser konstant eingestellt wer-den kann
03:46	730	Feuer brennt stetig weiter
04:19	763	Flammen werden kleiner, ca. 20-30 cm über Lagergut
06:48	912	Kaum noch sichtbare Flammen oberhalb des Lagerguts
08:00	984	Nur noch die Heptan-Wanne und unmittelbar angrenzende Kartons brennen
09:35	1079	Heptan läuft über
10:14	1118	Hohes Aufflammen des Feuers durch erste Reaktion eines Akkus, Funken sind zu sehen
10:42	1146	Starkes Aufflammen durch Reaktion eines Akkus, danach Feuer wieder hauptsächlich auf Schacht begrenzt
11:14	1178	Flammen an der Unterseite einer Target-Palette
25:00	2004	Kleine Flammen an der Außenseite einer Akku-Palette, sonst kaum sichtbare Flammen
29:50	2294	Nur noch im Schachtinneren kleine Flammen sichtbar
31:15	2379	Sprinkler aus, manuelles Löschen der tiefer sitzenden Glut-brände



Abbildung 16: Aufbau Versuch 1



Abbildung 17: Versuch 1 ca. 2 min



Abbildung 18: Versuch 1 ca. 4 min



Abbildung 19: Versuch 1 ca. 7 min

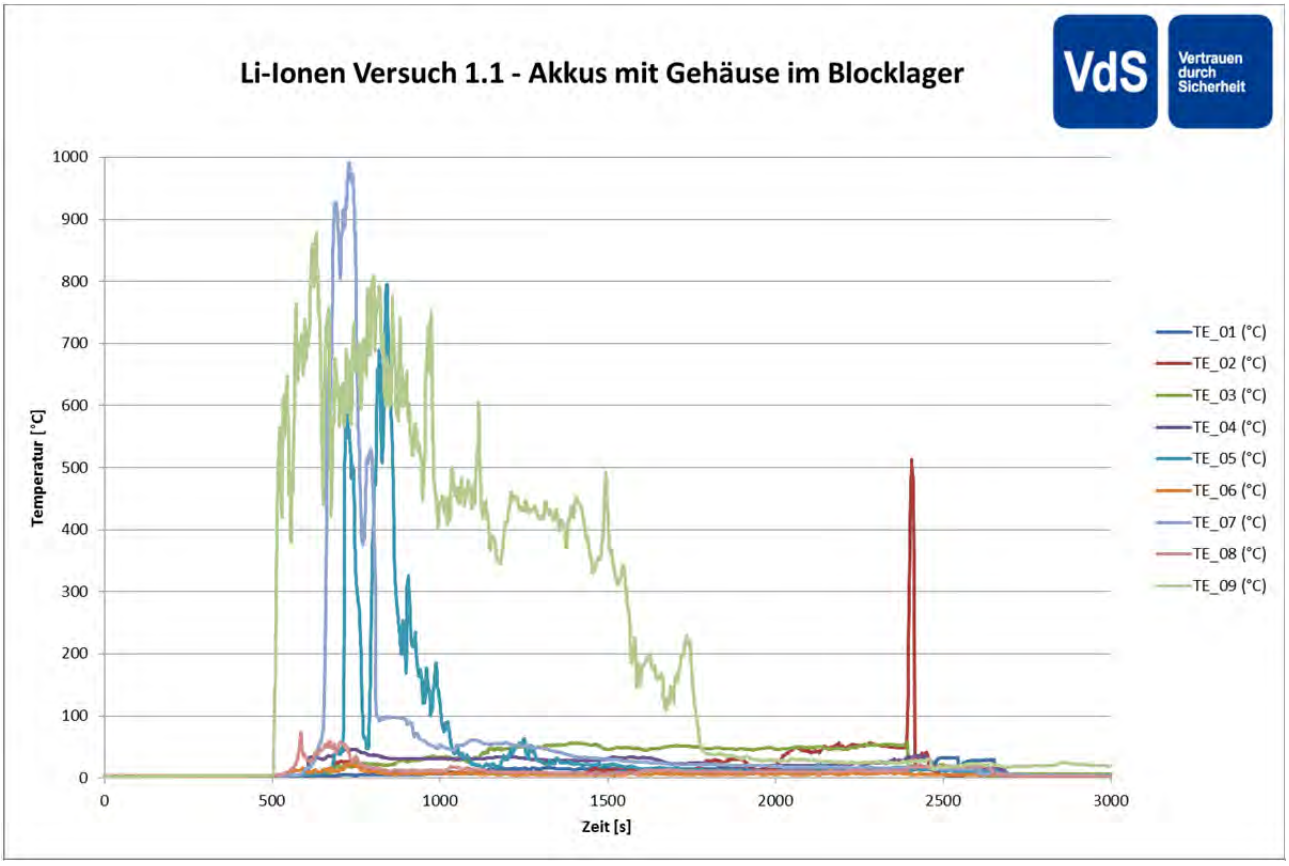


Abbildung 20: Versuch 1 nach dem Löschen



Abbildung 21: Akkuzellen nach Reaktion

4.3.1.2 *Messdaten*



4.3.1.3 *Beobachtungen*

Nach der Zündung der Brandwanne griff das Feuer zunächst auf die schachtseitige Verpackungsfolie der Akku-Paletten über. Der erste Sprinkler öffnete sich und es gab ca. 1 Minuten lang Probleme bei der Einstellung eines stabilen Drucks. Das Feuer über der Zündquelle wurde zunächst deutlich kleiner, entlang des Schachts brannten die Kartons im Bereich der Zündquelle stetig weiter. Ungefähr 10 Minuten nach Zündung waren die ersten Reaktionen der Akkus zu beobachten: ein Aufflammen des Feuers verbunden mit einem Knall und sichtbaren Funken. Das Feuer blieb jedoch weiterhin auf den Schacht begrenzt. Durch das Auslaufen der Brandwanne setzte sich das Feuer auf der Unterseite der Paletten fort und erreichte die Unterseite einer Palette mit Targets. Die Reaktionen der Akkus waren vereinzelt, aber weiterhin zu beobachten. Das Feuer im Schacht wurde kontinuierlich kleiner, bis schließlich, außer vereinzelten kleinen Flammen an der Außenseite der Akku-Kartons, kaum Flammen zu sehen waren. Nachdem sich das Feuer weder weiter ausbreitete, noch allein durch die Löschanlage verloschte, wurde nach ca. 31 Minuten die Löschanlage abgeschaltet und manuell gelöscht.

4.3.2 Versuch 2: Blocklager – Akkumulatoren ohne Gehäuse, diagonal

4.3.2.1 *Ablauf*

Zeit (mm:ss)	Messzeit Temperatur-kurven (s)	Beobachtung
00:00	182	Zündung
02:01	303	Sprinkler auf
03:30	392	Flammen mittig bis ca. 0,45 m über der Oberkante des Lagerguts sichtbar
03:50	412	Erste Li-Ionen-Zellen reagieren einzeln
07:00	602	Flammen zeitweise etwas kleiner, schlagen nur noch leicht über die Oberkante der Kisten hinaus
07:50	652	Flammenhöhe wieder ca. 0,5 m über der Oberkante der Kiste
11:12	854	Feuer brennt in der Mitte des Lageraufbaus stetig weiter
15:10	1092	Größere Flammen sind zu beobachten, tw. bis zu 0,8 m über dem Lagergut
17:56	1258	Immer wieder reagieren einzelne Akkus, abblasende Zellen schießen aus dem brennenden Lagergut durch die Luft
20:12	1394	In den brennenden Kisten gehen einzelne Akkus hoch, sprühende Funken und ein Aufflammen kann beobachtet werden
26:44	1786	Feuer brennt stetig weiter, ab und zu ist ein Aufflammen zu sehen
27:52	1854	Flammen werden kleiner, kaum noch über Höhe des Lagerguts hinaus sichtbar
28:37	1899	Von außen ist der Brand nicht mehr sichtbar
31:18	2060	Manuelles Löschen



Abbildung 22: Aufbau Versuch 2



Abbildung 23: Versuch 2 ca. 2 min



Abbildung 24: Versuch 2 ca. 23:30 min

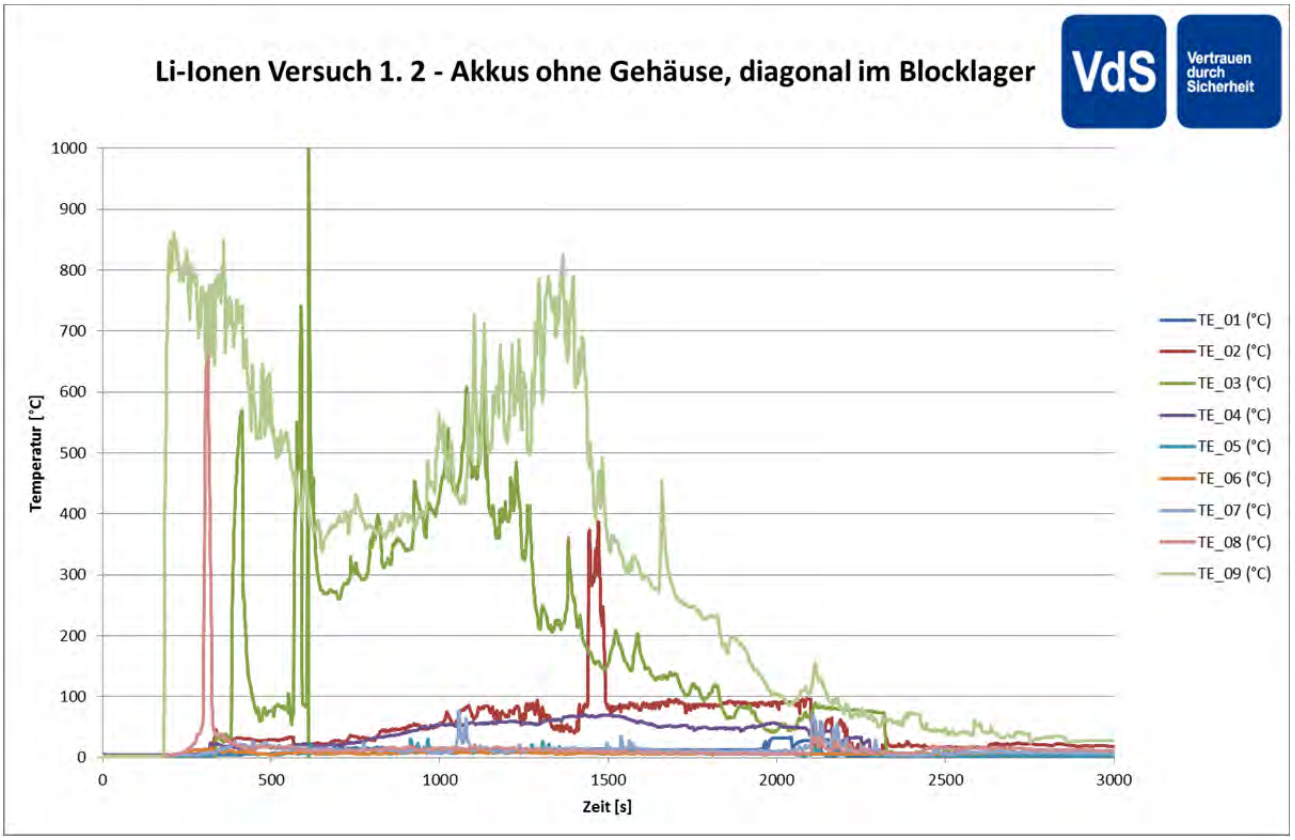


Abbildung 25: Manuelles Löschen Versuch 2



Abbildung 26: Brandschaden Versuch 2

4.3.2.2 *Messdaten*



4.3.2.3 *Beobachtungen*

In diesem Versuch bestand das Blocklager aus 2 Paletten von Akkus mit Gehäuse und „ Paletten von Akkus ohne Gehäuse, welche jeweils diagonal zueinander platziert wurden, sodass sich auf beiden Seiten des Schachts eine Palette mit und eine Palette ohne Gehäuse nebeneinander befand. Bereits 2 Minuten nach Zündung öffnete sich der erste Sprinkler, das Feuer im Schacht brannte mit einer Flammenhöhe von ca. 0,45 m oberhalb des Lagerguts beständig weiter. Bereits 3:30 Minuten nach Zündung, und damit deutlich früher als in Versuch 1, war die erste Reaktion eines Akkus zu beobachten. Im weiteren Verlauf waren wechselnd größere und kleinere Flammen zu beobachten. Ca. 18 Minuten nach Zündung reagierten wieder einzelne Akkus, vereinzelt wurden Zellen durch das Abblasen brennender Gase aus dem Versuchsaufbau heraus katapultiert. Kontinuierlich waren Reaktionen der Akkus anhand eines Aufflammens des Feuers, sprühender Funken und Knallgeräuschen zu beobachten. Die sichtbaren Flammen wurden nach und nach kleiner, während das Feuer schachtseitig an den Kartons beständig weiter brannte. Die Löschanlage begrenzte die Brandausbreitung größtenteils auf die an den Schacht grenzenden Kartons. Nachdem sich keine Veränderungen des Brandgeschehens mehr zeigten wurde ca. 32 Minuten nach der Zündung die Löschanlage abgeschaltet und manuell gelöscht.

Der Versuch zeigte, dass die Akkumulatoren und ihre Zellen ohne ein Gehäuse durch das Brandgeschehen zwar früher reagierten, aber im gewählten Versuchsaufbau keine unkontrollierte Brandausbreitung auf das gesamte Lagergut und die Targets stattfand. Die Reaktionen der Akkus setzten sich zwar innerhalb der Lagerbereiche fort, griffen allerdings kaum auf die benachbarten Blöcke mit Gehäuse über. Es wurde entschieden einen ver-

such mit einer andersartigen Lageraufteilung durchzuführen um zu prüfen auf welche Weise sich der Brandverlauf dadurch verändert.

4.3.3 Versuch 3: Blocklager – Akkumulatoren ohne Gehäuse an Innenkanten

Wie bereits in Abschnitt 4.3.2.3 beschrieben wurde vor Ort entschieden einen weiteren Versuch mit einer veränderten Verteilung der Kisten mit Akkus ohne Gehäuse durchzuführen. Um möglichst den ungünstigsten Fall abbilden zu können wurden dabei die Kisten mit Akkus ohne Gehäuse entlang des Schachts und damit in unmittelbarer Nähe der Zündquelle platziert, siehe Abbildung 27.

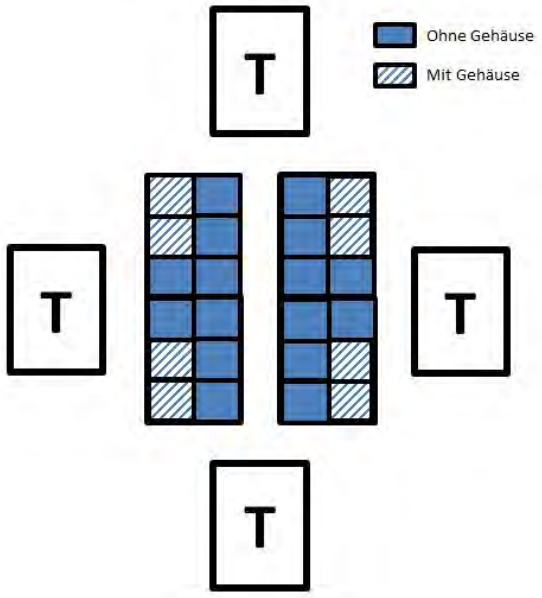


Abbildung 27: Positionierung der Akkus ohne Gehäuse

4.3.3.1 *Ablauf*

Zeit (mm:ss)	Messzeit Temperaturkurven (s)	Beobachtung
00:00	227	Zündung
01:01	288	Flammen zwischen 20-30 cm über Oberkante Lagergut
01:40	327	Flammen ca. 1 m über Oberkante Lagergut
01:44	331	Erster Sprinkler offen
02:26	373	Feuer etwas kleiner, Flammen nur noch ca. 20 cm über Lagergut
03:20	427	Erster Knall und Aufflammen des Feuers durch Reaktion der Akkus
03:50	457	Feuer deutlich größer, Flammen bis zu 1 m über Lagergut
04:00	467	Wiederholt reagieren Akkus
04:34	501	Nach der Reaktion eines Akkus fliegt die erste Zelle durch die

		Luft
06:20	607	Feuer hat sich inzwischen über beide Paletten entlang des Schachts ausgebreitet, immer wieder reagieren Akkus mit Funken und Trümmerflug einzelner Zellen, Flammen ca. 1,5 m über Lagergut
07:20	667	Zweiter Sprinkler auf
10:45	872	Feuer brennt unvermindert weiter, weiterhin Reaktionen der Akkus
18:26	1333	Kleinere Flammenhöhen, Feuer vor allem auf den hinteren Schachtbereich konzentriert
21:14	1501	Nach einem kräftigen Aufflammen nur noch kleines Feuer im Schacht
23:00	1607	Kaum noch von außen sichtbare Flammen, Feuer brennt im Schacht weiter, immer wieder reagieren Akkus und ein starkes Aufflammen an verschiedenen Bereichen im Schacht ist zu sehen
33:30	2237	Manuelles Löschen



Abbildung 28: Aufbau Versuch 3



Abbildung 29: Versuch 3 ca. 10 min



Abbildung 30: Versuch 3 ca. 4 min



Abbildung 31: Versuch 3 ca. 32 min

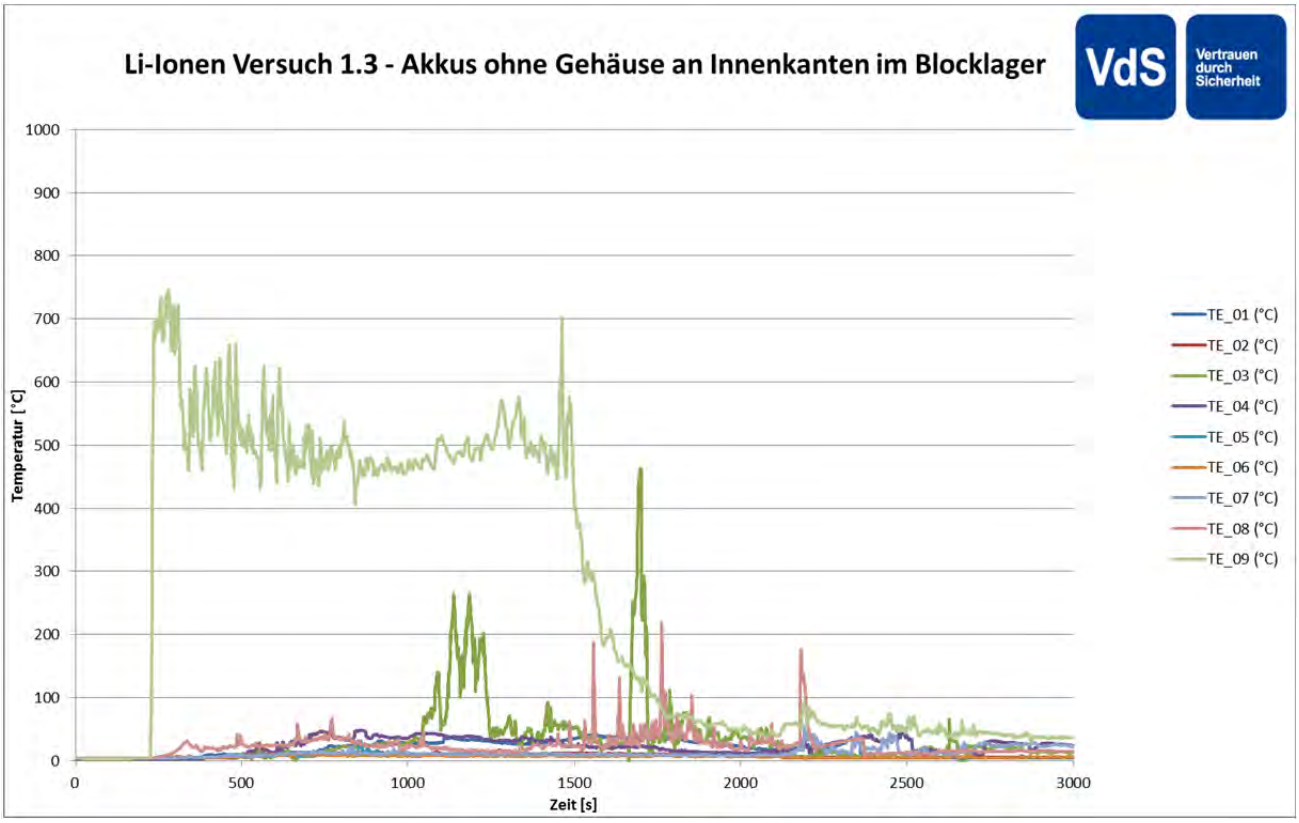


Abbildung 32: An der Reaktion beteiligte Akkus



Abbildung 33: Versuch 3: fliegende Akku-Zelle, ca.12 min

4.3.3.2 *Messdaten*



4.3.3.3 *Beobachtungen*

Nachdem die Flammen innerhalb der ersten Minuten eine Höhe von 1 m über der Oberkante des Lagerguts erreichten öffnete bereits knapp 2 Minuten nach der Zündung der erste Sprinkler. Die Flammen wurden daraufhin zunächst kleiner, dass Feuer im Schacht brannte jedoch kontinuierlich weiter. Nach 3 Minuten reagierte der erste Akku, was in Form eines laut hörbaren Knalls, begleitet durch ein Aufflammen und sprühende Funken erkennbar war. Das Feuer nahm an Höhe und Breite zu. Immer wieder, in kürzeren Abständen als in Versuch 2, reagierten weitere Akkus. 7 Minuten nach der Zündung hatte sich das Feuer entlang der gesamten Schachtlänge ausgebreitet und ein zweiter Sprinkler öffnete sich. Wie in Versuch 2 wurden auch hier im Brandverlauf einzelne Akkuzellen infolge der Reaktion der enthaltenen Elektrolyt-Flüssigkeit aus dem Brandgeschehen heraus geschossen. Unterbrochen von stärkerem Aufflammen des Feuers (aufgrund der Reaktion von Akkuzellen) wird das Feuer im Schacht langsam schwächer. 23 Minuten nach Zündung sind von außen kaum noch Flammen zu sehen, nur im Inneren des Schachts brennen kleine Flammen. Ungefähr nach 33 Minuten wird die Löschanlage abgestellt und das Feuer im Schachtinneren wird manuell gelöscht.

4.3.4 Versuch 4: Regallager – Akkumulatoren mit Gehäuse

4.3.4.1 *Ablauf*

Zeit (mm:ss)	Messzeit Tempera-turkurven (s)	Beobachtung
00:00	195	Zündung
00:15	210	Flammen auf Höhe der ersten Palette
00:30	225	Flammen auf Höhe der zweiten Palette
00:42	237	Flammen auf Höhe der dritten Palette
00:44	239	Erster Sprinkler offen (vorne rechts)
01:52	307	Zündwanne ist übergelaufen
03:02	377	Auf der dritten Regalebene brennt ein kleines Feuer
04:24	459	In den unteren Ebenen sind keine Flammen mehr zu sehen, in der dritten Ebene brennt die Verpackungsfolie
06:23	578	Flammen auf der Vorderseite der dritten Ebene
10:10	805	Das Feuer brennt weiterhin auf der obersten Ebene
11:50	905	Erste Akkus fallen aus der Palette in der dritten Ebene
13:11	986	Das Feuer in der dritten Ebene brennt im Wesentlichen nur auf der Vorderseite der mittleren Palette in der ersten Re-galzeile
14:30	1065	Flammen breiten sich auf die rechte Palette aus
14:45	1080	Die Flammen breiten sich über die gesamte oberste Ebene der vorderen Regalzeile aus
15:10	1105	Der erste Sprinkler der obersten Ebene ist offen, die oberste Ebene steht im Vollbrand
17:00	1215	Paletten selbst brennen
18:00	1275	Vollbrand in 3. Und 4. Ebene
20:00	1395	Alle drei Paletten in der vorderen Ebene stehen in Brand, Ak-kus fallen herab
24:06	1641	Erste Akkuzellen auf der oberen linken Palette blasen ab
31:15	2070	Beginn des manuellen Löschangriffs
32:40	2155	Löschanlage wird abgeschaltet



Abbildung 34: Aufbau Versuch 4



Abbildung 35: Versuch 4 ca. 40 s

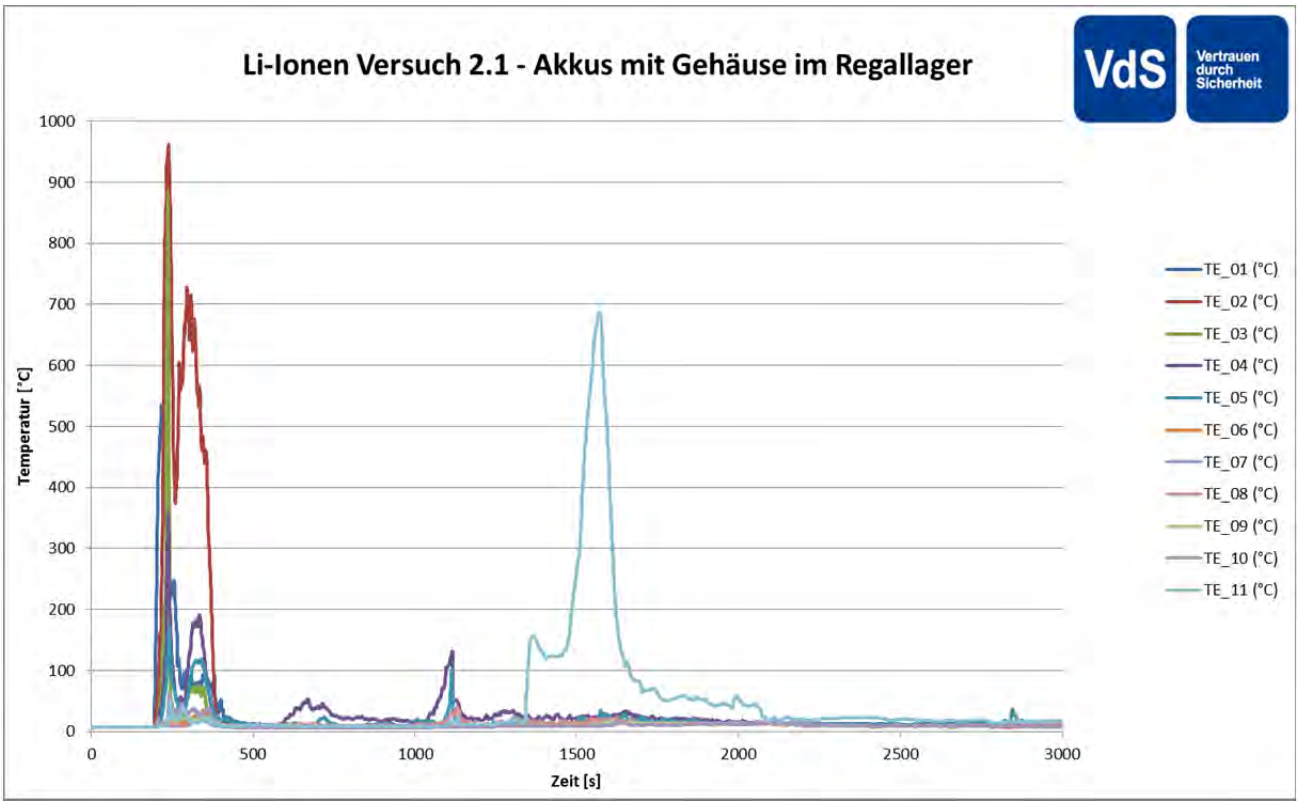


Abbildung 36: Versuch 4 ca. 8:10 min



Abbildung 37: Versuch 4 ca. 22 min

4.3.4.2 *Messdaten*



4.3.4.3 *Beobachtungen*

Nach der Zündung der Brandwanne breitete sich das Feuer schnell in vertikaler Richtung aus. Innerhalb der ersten Minute öffnete sich der erste Sprinkler am unteren Strangrohr. Daraufhin lief die Brandwanne ca. 2 Minuten nach der Zündung über und das Feuer in den unteren beiden Regalebenen wurde schnell eingedämmt. Dort waren nach ca. 4:20 Minuten keine Flammen mehr zu sehen. Währenddessen brannte in den oberen Regalebenen zunächst die Kunststofffolie, mit der die Kartons auf den Paletten umwickelt waren. Danach griff das Feuer auf der Vorderseite des Regals auf die Kartons über. 12 Minuten nach der Zündung fielen dadurch die ersten Akkus aus den brennenden Kisten der oberen Regalebenen hinab. Vor allem auf der obersten Ebene breitete sich das Feuer auf der Vorderseite des Regals aus. Nach 15 Minuten öffnete sich dann der erste Sprinkler am oberen Strangrohr. Nach 18 Minuten standen die Vorderseiten der beiden oberen Regalebenen im Vollbrand. Die ersten Akkuzellen reagierten auf der linken Palette der obersten Ebene. Vor allem die Vorderseite der Paletten brannte ungehemmt weiter, da durch die Positionierung der Sprinkler mittig über dem Schacht zwischen den Regalzeilen die Löschwirkung des Wassers die Vorderseite des Regals kaum erreichte. 31 Minuten nach der Zündung wurde schließlich manuell gelöscht und die Anlage abgeschaltet.

4.3.5 Versuch 5: Regallager – Akkumulatoren ohne Gehäuse

4.3.5.1 *Ablauf*

Zeit (mm:ss)	Messzeit Temperaturkurven (s)	Beobachtung
00:00	282	Zündung
00:20	302	Flammen auf Höhe der ersten Palette
00:32	314	Flammen bis Unterkante der zweiten Palettenebene
01:00	342	Erster Sprinkler offen
01:55	397	Flammen an Unterkante der dritten Palettenebene
03:50	512	Erste Palette hohe Flammen
04:09	531	Nur noch kleines Bodenfeuer zu sehen
05:20	602	Feuer aus



Abbildung 38: Aufbau Versuch 5



Abbildung 39: Zündquelle Versuch 5

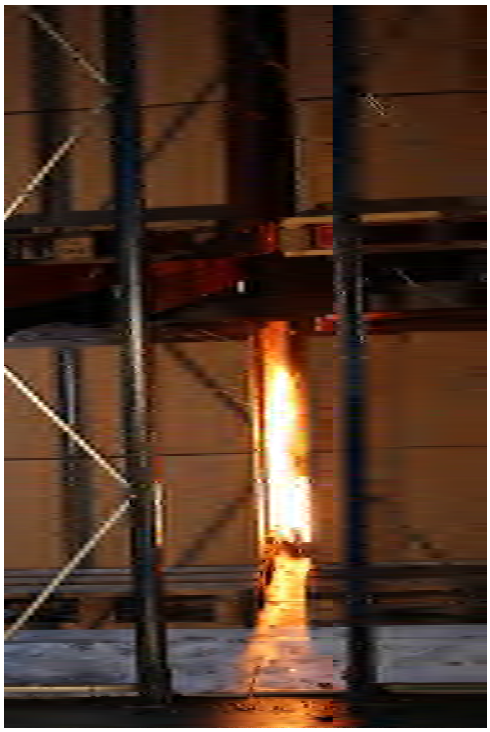


Abbildung 40: Versuch 5 ca. 30 s

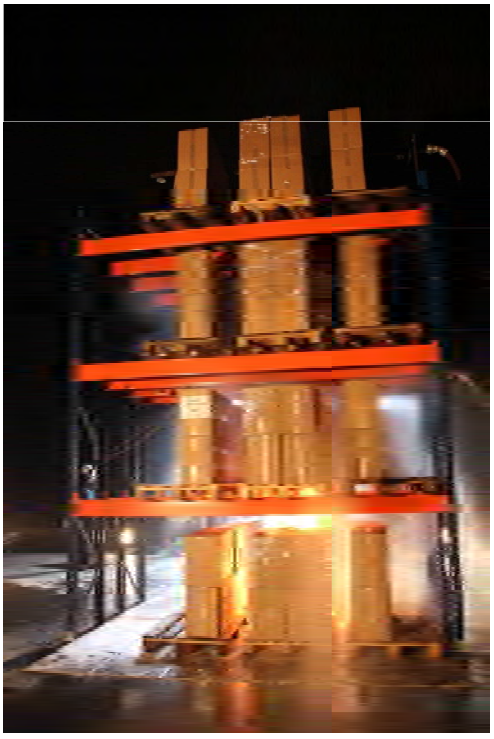


Abbildung 41: 1. Sprinkler geöffnet, ca. 1 min



Abbildung 42: Versuch 5 ca. 4:20 min

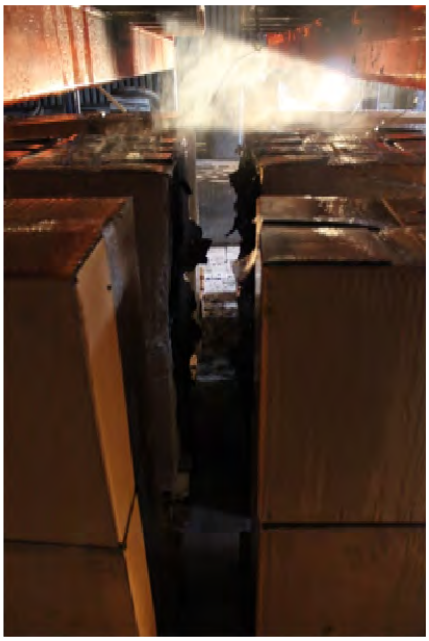
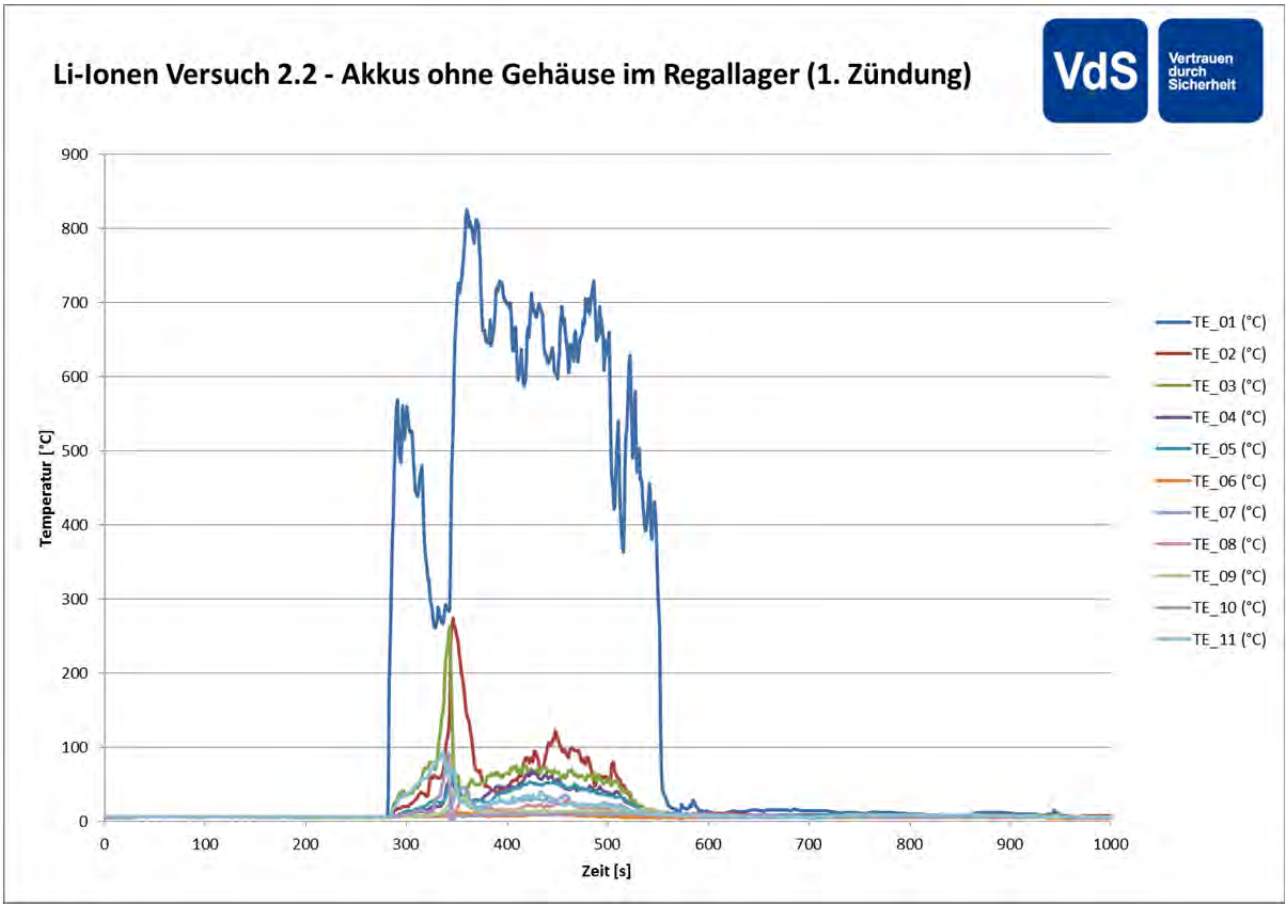


Abbildung 43: Versuchsende

4.3.5.2 *Messdaten*



4.3.5.3 *Beobachtungen*

Nach der Zündung der Brandwanne mittig im Schacht zwischen den Regalzeilen griffen die Flammen zunächst auf die Wickelfolie und auf die Verpackungskartons der unteren Ebene über. Die Flammen erreichten zunächst die Unterseite der zweiten Ebene und im weiteren Verlauf züngelten die Flammen verstärkt bis über die Oberkante der zweiten Palettenebene hinaus. Bereits ca. 1 Minute nach Zündung wurden dadurch auf der Höhe des ersten Sprinkler-Strangrohres ausreichende Temperaturen erreicht und der zweite Sprinklerkopf von Links öffnete sich. Durch die Öffnung dieses Sprinklers im Schacht zwischen den Regalzeilen wurde das Löschwasser unmittelbar über der Zündquelle ausgebracht, sodass diese nach weiteren 3 Minuten überlief und verlosch. Lediglich ein kleines Bodenfeuer unter der mittleren, vorderen Paletten brannte noch weiter, bis auch dieses nach insgesamt 5 Minuten und 20 Sekunden erlosch. Aufgrund dieses vorzeitigen Verlöschens der Zündquelle wurde dies nicht als ungünstigster Brandverlauf bewertet. Es wurde im Nachgang entschieden, diesen Versuch mit einem modifizierten Aufbau durchzuführen. Eine Brandentstehung im vorderen Bereich der Paletten sollte dabei den ungünstigeren Fall abbilden.

4.3.6 Versuch 6: Regallager – Akkumulatoren ohne Gehäuse, Zündung vorn

Aufgrund der Beobachtung des Brandverlaufs aus Versuch 5 wurde die Durchführung eines weiteren Versuchs beschlossen. Die Positionierung der Zündquelle wurde in diesem Szenario auf der Vorderseite der ersten Regalzeile, im linken Schacht zwischen den Lagersäulen vorgenommen, siehe Abbildung 45. Außerdem wurden zwei Zündwannen und damit die doppelte Menge n-Heptan verwendet, sodass die Zündung mit einer höheren Energiefreisetzungsrate sowie einer längeren Brenndauer durchgeführt wurde.

4.3.6.1 *Ablauf*

Zeit (mm:ss)	**Messzeit Temperaturkurven (s)**	**Beobachtung**
00:00	1410	Zündung
00:15	1425	Flammen bis Oberkante der ersten Palettenebene
00:44	1454	Flammen erreichen die Unterseite der zweiten Palettenebene
00:55	1465	Flammen bis Oberkante der zweiten Palettenebene
01:08	1478	Flammen bis Unterkante der dritten Palettenebene
01:54	1524	Flammen bis Oberkante der 4. Palettenebene
02:00	1530	Flammen auf allen Ebenen entlang des Schachts
02:12	1542	Erster Sprinkler offen (oberer Strang), dadurch kaum noch Flammen auf oberen Ebenen
02:35	1565	Flammen nur noch bis Unterkante 3. Ebene sichtbar
03:10	1600	Erste Zellen fallen aus den brennenden Kartons
03:33	1623	Ersten Zellen reagieren
04:06	1656	Feuer brennt vor allem auf der untersten Ebene

04:40	1690	Feuer breitet sich auf der Vorderseite des Regals bis auf die 2. Und 3. Ebene aus
12:50	2180	Auf der dritten Ebene reagieren viele Akkus zeitlich knapp aneinander gereiht, Aufflammen und Funkensprühen sind zu sehen
14:19	2269	Es fallen immer wieder Trümmerteile herab, Akkus brennen am Boden liegend weiter
31:00	3270	Feuer auf allen Ebenen, allerdings nur auf der Vorderseite der ersten Regalzeile
32:04	3334	Manueller Löschangriff



Abbildung 44: Aufbau Versuch 6



Abbildung 45: Zündquelle Versuch 6



Abbildung 46: Versuch 6 ca. 2 min



Abbildung 47: Versuch 6 ca. 3:15 min

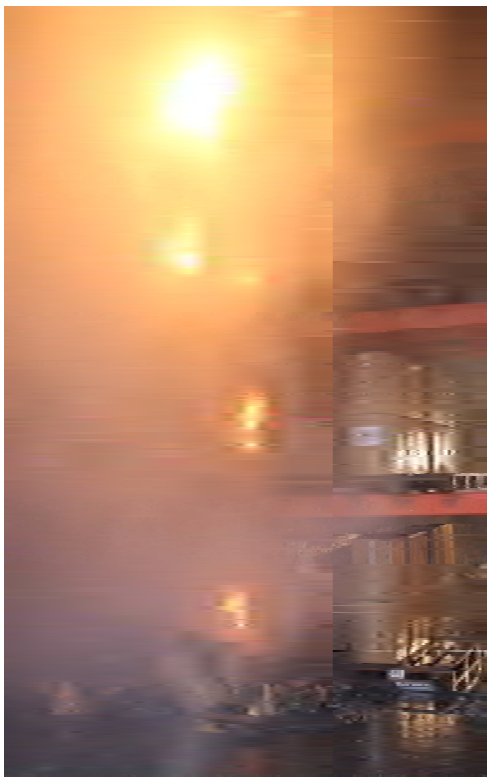
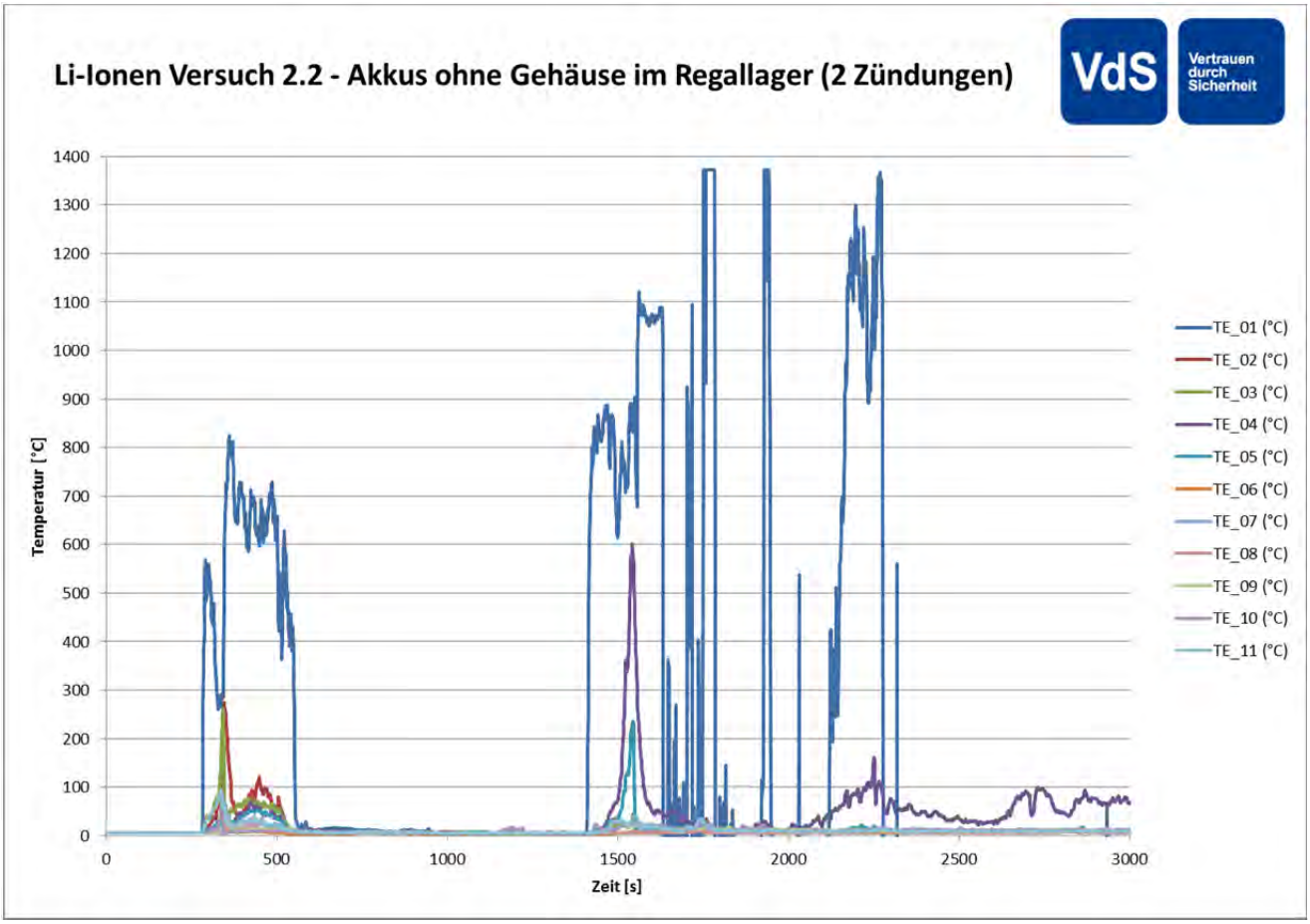


Abbildung 48: Versuch 6 ca. 30 min



Abbildung 49: Brandschaden Versuch 6

4.3.6.2 *Messdaten*



4.3.6.3 *Beobachtungen*

Nach der Zündung erreichten die Flammen innerhalb der ersten Minuten die 4. Regalebene. Auf allen Ebenen entlang des Schachts brannte zunächst die Wickelfolie und schließlich auch die Umkartons. Ein erster Sprinkler öffnete am oberen Strang, woraufhin auf den oberen Ebenen keine Flammen mehr zu sehen waren. Die Flammen in den unteren Ebenen reichten nur bis zur Unterseite der 3. Ebene. Im unteren Bereich fielen erste Akkus aus den Kartons oder reagierten. Auf der Vorderseite der ersten Regalzeile breitete sich das Feuer wieder bis auf die zweite und dritte Regalebene aus. In der dritten Ebene reagierten in enger zeitlicher Abfolge viele Akkus, begleitet jeweils durch ein Aufflammen und das Sprühen von Funken. Immer mehr Trümmer fielen herab und die herab gefallenen Akkus brannten am Boden liegend weiter. Das Feuer breitete sich schließlich bis auf die Vorderseite der 4. Regalebene aus, sodass die beiden linken Lagersäulen auf der Vorderseite der ersten Regalzeile im Vollbrand standen. Nach 32 Minuten wurde der Brand manuell gelöscht.

5 Auswertung

5.1 Brandverlauf und Brandschaden

Die Brandversuchsreihe ermöglichte den Vergleich verschiedener Lagersituationen und zeigte Unterschiede in Brandverlauf und Schadensausmaß abhängig vom Zustand der verwendeten Akkus (mit oder ohne Gehäuse). In den Versuchsszenarien in welchen Akkumulatoren ohne Gehäuse verwendet wurden war insgesamt ein schnellerer Brandverlauf mit früheren und häufigeren Reaktionen der Akkus zu beobachten

Im Blocklager betraf der Brandschaden in allen Fällen hauptsächlich die Lagerpaletten, die platzierten Targets nahmen am Brandgeschehen nicht teil. Auch in den Versuchen, in welchen Akkumulatoren ohne Gehäuse verwendet wurden, konnte das Feuer soweit auf den Bereich um die Zündquelle herum begrenzt werden. Lediglich die dem Blocklager zugewandte Seite der Targets zeigte leichte Brandspuren.

Im Regallager betraf der Brandschaden alle vier Regalebenen. Im Versuch der Akkus mit Gehäuse konzentrierte sich der Schaden jedoch größtenteils auf die vordere Regalzeile und die mittlere Lagersäule, am stärksten betroffen waren die beiden oberen Ebenen. Die Auswirkungen des Brandes im 6. Versuch erstreckten sich in größerem Maß über alle Ebenen, ebenfalls in der vorderen Regalzeile, da die Löschanlage die Ausbreitung des Entstehungsbrandes über den Schacht hinweg verhindern konnte. Dieser Versuch zeigte einen deutlich schnelleren Brandverlauf und eine schnellere Abfolge der Reaktionen der Akkus. Hier muss klar angemerkt werden, dass bei diesen Versuchen kein Deckenschutz durch Sprinkler verwendet wurde. Dieser hätte vermutlich auch den Schaden an der Vorderseite des Lagergutes sehr deutlich reduziert.

5.2 Film- und Fotoaufnahmen

Die Brandversuche wurden mit Fotoaufnahmen (jpg-Format) vor, während und nach den Brandversuchen dokumentiert.

Zusätzlich wurden die Brandversuche mit einer Normalbildkamera und einer Wärmebildkamera aufgezeichnet.

Diese Dateien wurden dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

6 Bewertung in Bezug auf die Wirksamkeit von Sprinklerkonzepten

In Bezug auf die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen bei den in den Versuchen verwendeten Lagersituationen und Brandlasten lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Durch die Beaufschlagung mit Wasser findet keine Verschlimmerung des Brandszenarios statt. Vielmehr hat sich gezeigt, dass die Beaufschlagung mit Wasser eine Reduzierung der Brandausbreitung und in den meisten Fällen sogar eine deutliche Reduzierung der Brandintensität nach sich zieht.
- Wesentlich am Brand beteiligt sind auch Verpackungsmaterialien sowie die Anbauteile aus Kunststoff. Durch die Beteiligung der Li-ionen Akkus kommt es zu einer höheren Brandintensität im Vergleich ohne deren Beteiligung.

- Es hat sich sehr deutlich gezeigt, dass eine möglichst frühzeitige Auslösung, vollständige Benetzung und Kühlung des Brandgutes wesentlich zu einer deutlich verlangsamten Reaktion der Akkus und damit auch der Brandentwicklung führt.

Trotz der positiven Versuchsergebnisse lassen sich die Erkenntnisse noch nicht allgemeingültig auf Lagersituationen übertragen. Dies hat im Wesentlichen die folgenden Gründe:

- Es wurden ausschließlich Akkupakete einer Baureihe bzw. eines Typs mit ICR 18650 Zellen in den Versuchen verwendet. Hinzu kam, dass es sich um keine neuwertigen Produkte, sondern um Rückläufer gehandelt hat. Auch wenn diese Brandlast bereits sehr gute Orientierungswerte über das grundsätzliche Brandverhalten gibt, lassen sich hier keine allgemeingültigen Aussagen, insbesondere nicht für andere Zelltypen, treffen. In weiteren Untersuchungen des Institutes der Feuerwehr des Landes Sachsen-Anhalt wurde gezeigt, dass andere Zelltypen zum Teil erheblich reaktiver reagieren können.
- In den Versuchen wurden nur ganz bestimmte, auf das Lagergut und Verpackungsmaterial abgestimmte, Sprinklerkonzepte untersucht. Es kann daher nicht beurteilt werden, ob andere Konzepte bessere Wirkung zeigen würden.
- Die verwendeten Akkupakete wurden in einer bestimmten Bauart verwendet, die zum Teil einen erheblichen Einfluss auf die Brandentwicklung hat. Gerade aufgrund der Vielzahl der Verwendungsmöglichkeiten und weiterer am Brand beteiligter Produkte und Materialien lassen sich hier keine allgemeinen Aussagen treffen.
- Es wurden ausschließlich BAM-zugelassene Kartonagen verwendet. Dies hat, gerade in der Brandentstehung, einen erheblichen Einfluss. Die Ergebnisse können daher nicht ohne weiteres auf andere Verpackungen oder einer Lagerung ohne Verpackung übertragen werden.

Aus den oben genannten Gründen wird daher bei der Lagerung von Li-Ionen Akkus oder Geräten, die solche Akkus enthalten, eine ganzheitliche Beurteilung der Schutzmaßnahmen durch eine fachkundige Person, auch unter Heranziehung dieser und ggf. anderer Versuchsergebnisse, durchgeführt werden müssen. Dies muss natürlich auch Maßnahmen des baulichen und organisatorischen Brandschutzes sowie den Umgang mit den Brandfolgeprodukten beinhalten.

Eine schnell wirkende Sprinkleranlage mit einer hohen Wasserbeaufschlagung kann daher eine mögliche Maßnahme zu einer Reduzierung des Schadens sein. Genaue Dimensionierungsparameter müssen auch auf die Materialien und Lagersituationen abgestimmt werden.

7 Zusammenfassung und Fazit

Wasser hilft die Auswirkungen von Bränden mit Li-Ionen Batterien zu begrenzen

Diese Versuche, aber auch andere Versuchsreihen durch Hersteller und Feuerwehren haben gezeigt, dass eine schnelle und zielgerichtete Kühlung durch Wasser dazu beiträgt, die Auswirkungen von Bränden unter Beteiligung von Li-Ionen Akkus zu begrenzen. Eine Reaktion der Akkus kann damit deutlich verlangsamt und zum Teil verhindert werden.

Schnell wirkende Sprinkler- oder Sprühwasserlöschanlagen stellen einen wirksamen und notwendigen Schutz dar

Die Versuche haben gezeigt, dass eine schnell ansprechende Sprinkler- oder Sprühwasserlöschanlage einen geeigneten und wirksamen Schutz von Lagern darstellen kann, in denen auch Geräte mit Li-Ionen Akkus gelagert werden. Oft stellen nicht nur die Akkus an sich die Brandlast dar, sondern auch die Verpackung oder die Geräte in denen die Akkus zur Anwendung kommen.

Neben automatischen Löschanlagen müssen immer bauliche und organisatorische Randbedingungen ganzheitlich betrachtet werden

Für einen wirksamen Schutz solcher Lagerbereiche ist ein ganzheitliches Brandschutzkonzept unabdingbar. Dies beinhaltet nicht nur eine wirksame und zuverlässige automatische Brandmelde- und Löschanlage, sondern ggf. auch bauliche Maßnahmen sowie Einsatzstrategien für die Feuerwehr.

Für wirksame Schutzkonzepte mit Sprinkleranlagen ist eine Einzelbetrachtung notwendig

Derzeit liegen nur für sehr ausgewählte Rahmenparameter gesicherte Versuchsergebnisse vor, die eine Wirksamkeit von Sprinkleranlagen bestätigen.

Solange keine anderen Erkenntnisse vorliegen, wird empfohlen, dass sich die Auslegung der Sprinkleranlage am Verpackungsmaterial sowie an den gelagerten Materialien orientiert.

Darüber hinaus sollten folgende Punkte geklärt werden:

- Die Versuche sind mit Akkus vom Typ ICR18650 durchgeführt worden. Daher gelten alle Aussagen bis weitere Erkenntnisse vorliegen nur für diesen Typ. Die Lagerung von beschädigten Akkus ist nicht mit abgedeckt.
- Es wird nur eine Mischlagerung (chaotisches Lager) abgedeckt. Die Produktion oder die reine Lagerung von Li-Ionen Akkus, insbesondere ohne Transportverpackung, ist nicht abgedeckt. Hier ist eine Abstimmung im Einzelfall erforderlich.
- Die folgenden Angaben beziehen sich auf die VdS CEA 4001:2014-04(05): Die in den Versuchen verwendete Brandlast wird als Kategorie III. eingestuft. Die Auslegung der Sprinkleranlage erfolgt nach HHP/HSS 3 mit einer Wasserbeaufschlagung von mindes-

tens 12,5 mm bzw. nach Abschnitt 11.5. Konzepte wie z.B. gemäß Anhang K.7 der VdS CEA 4001 sind auch möglich.

- Regallager: Es müssen Regalsprinkler (s. Abschnitt 11.5 VdS CEA 4001) eingesetzt werden. Es sollte vermieden werden, dass Paletten mit Li-Ionen Akkus direkt nebeneinander oder direkt übereinander gelagert werden.
- Es ist immer eine Abstimmung im Einzelfall zu treffen.

Anhang A – Fotos



Abbildung 50: Beflammung einzelner Akku-Zellen



Abbildung 51: Abblasen brennbarer Gase



Abbildung 52: Akku stehend über Brandwanne



Abbildung 53: 8 Akkupacks und 2 Target-Kartons



Abbildung 54: Aufbau Versuch 2 mit Thermoelementen



Abbildung 55: Manuelles Löschen Versuch 2

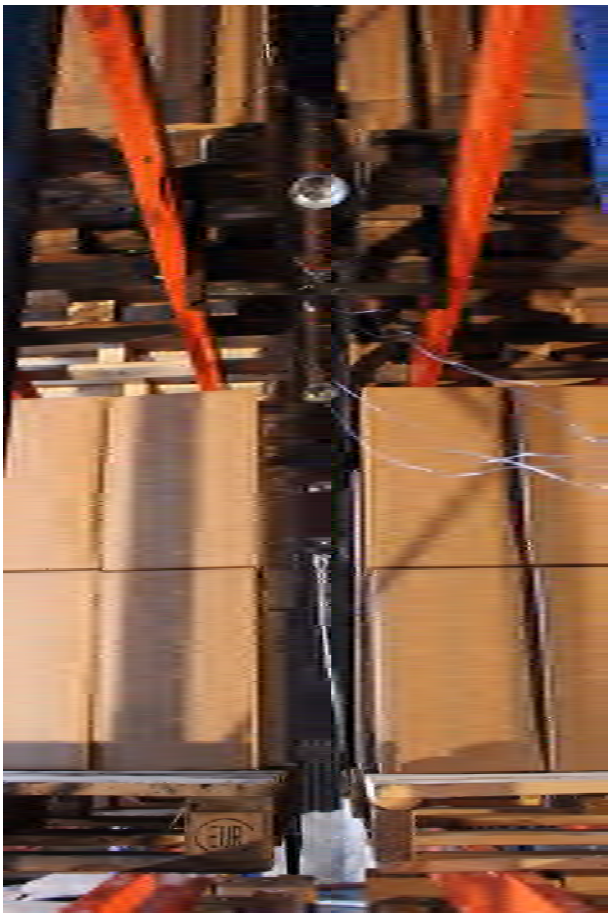


Abbildung 56: Sprinklerstrangrohr mit Thermoelementen



Abbildung 57: Herabfallende Akkus Versuch 4



Abbildung 58: Zündung Versuch 4



Abbildung 59: Schacht mit Thermoelementen Versuch 4



Abbildung 60: Akkuzellen nach Versuch 6



Abbildung 61: Manuelles Löschen Versuch 6

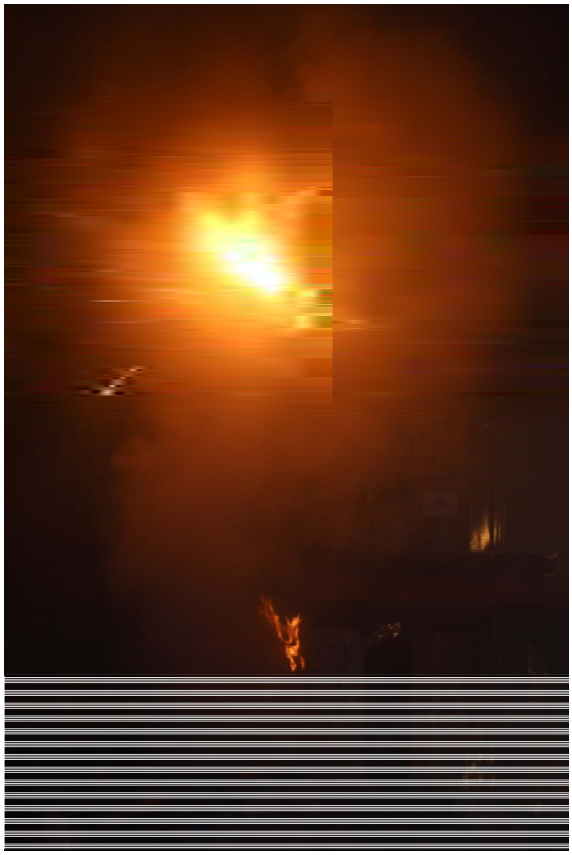
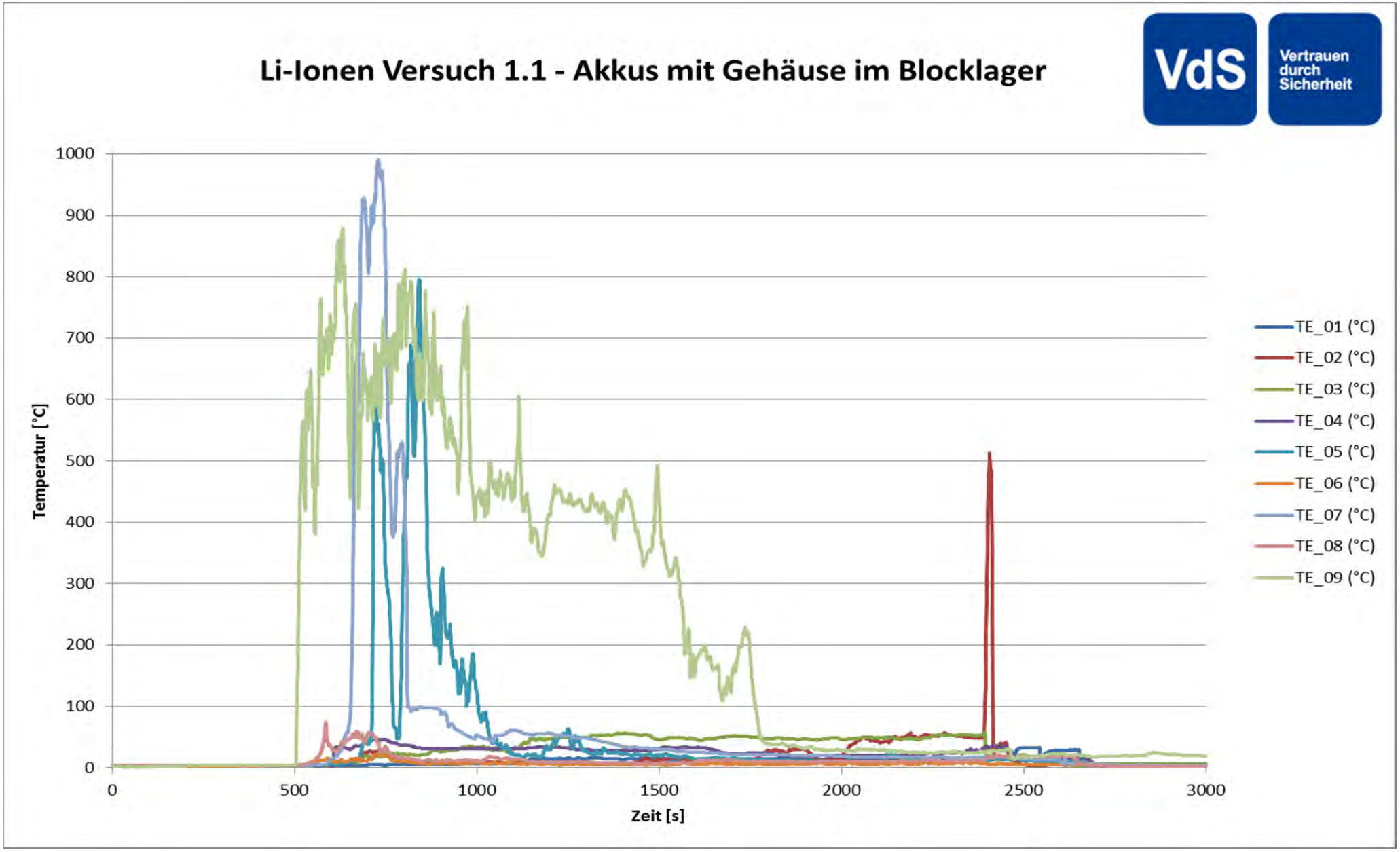
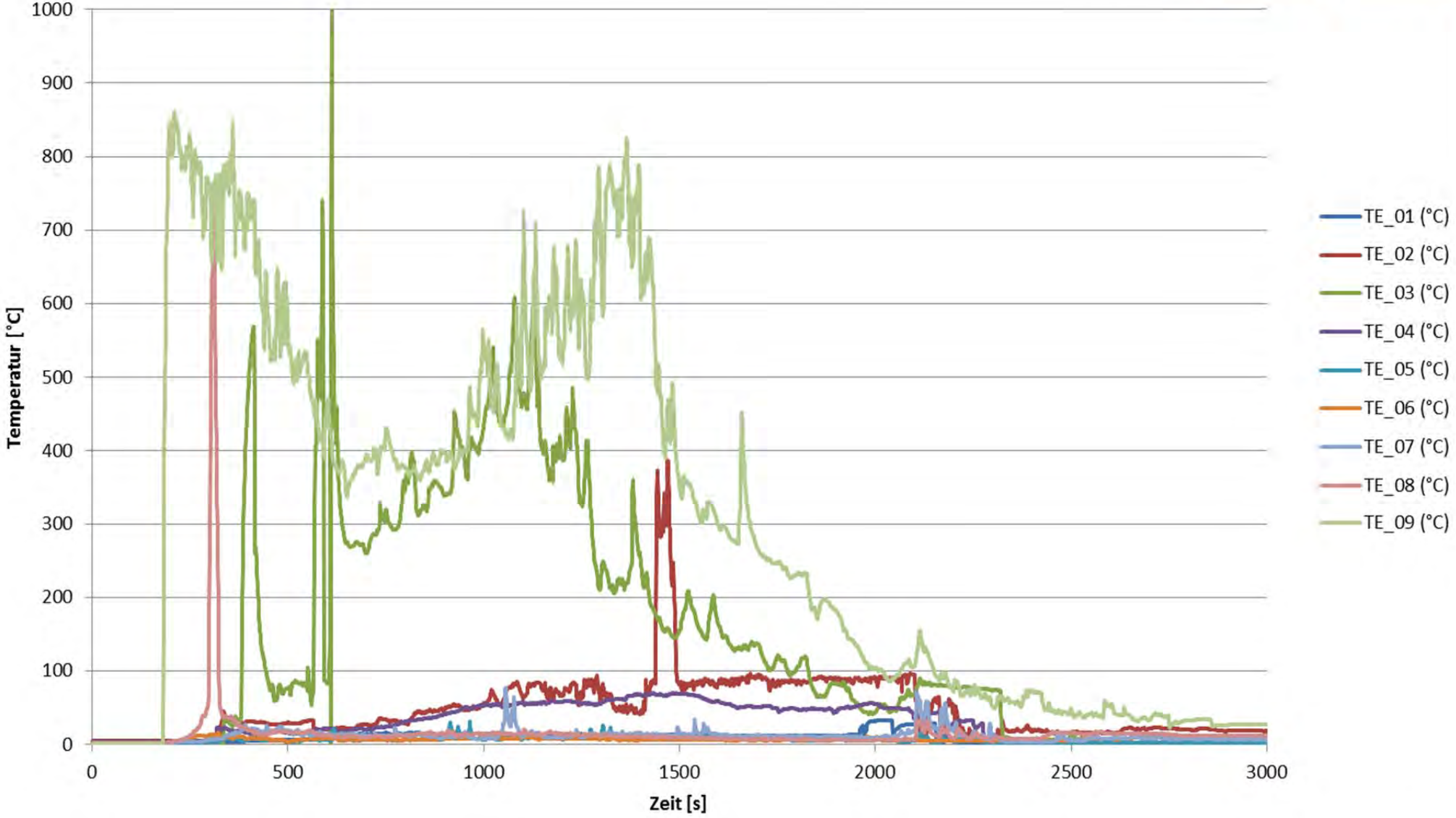


Abbildung 62: Reaktion eines Akkus, Versuch 6

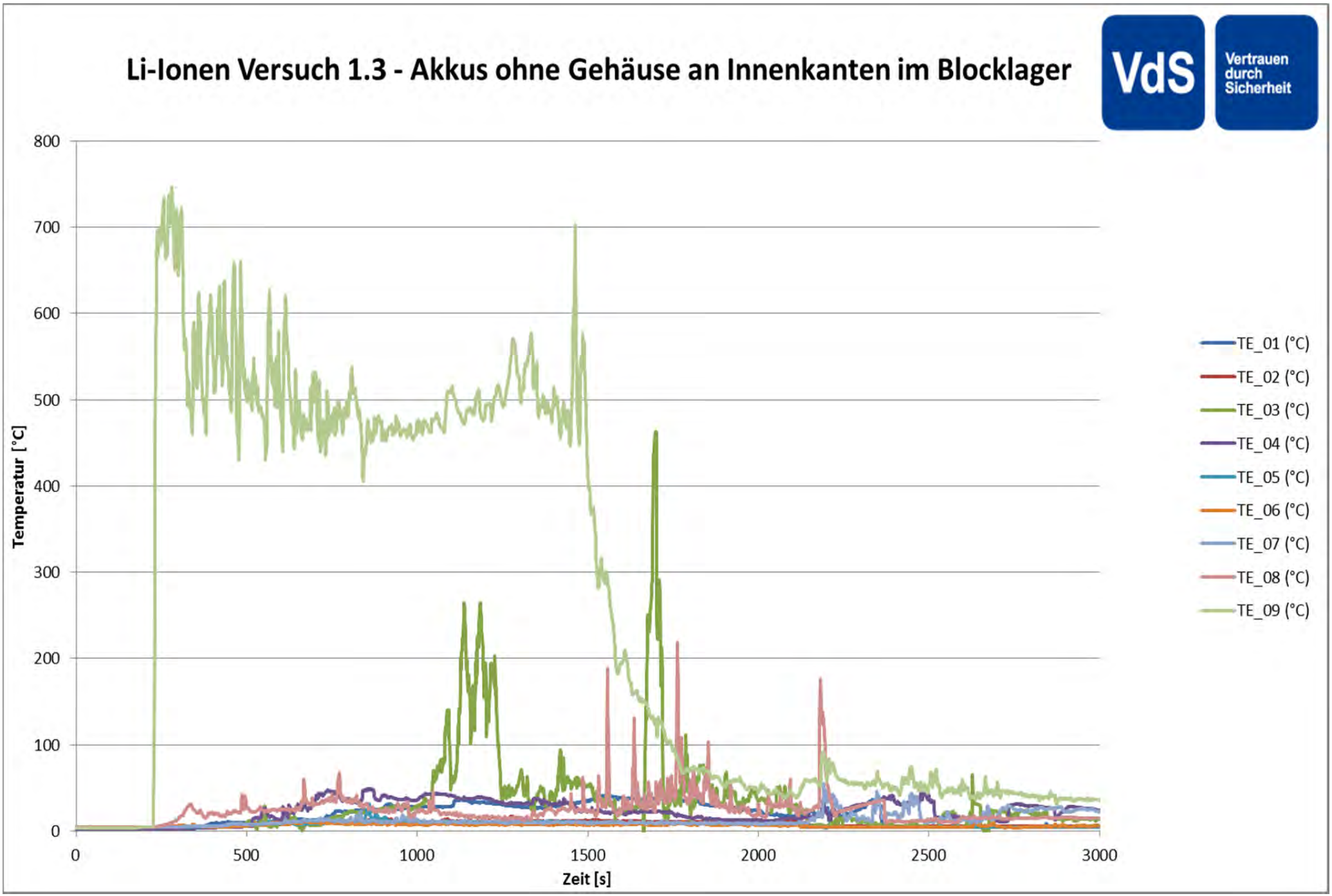
Anhang B – Messdaten

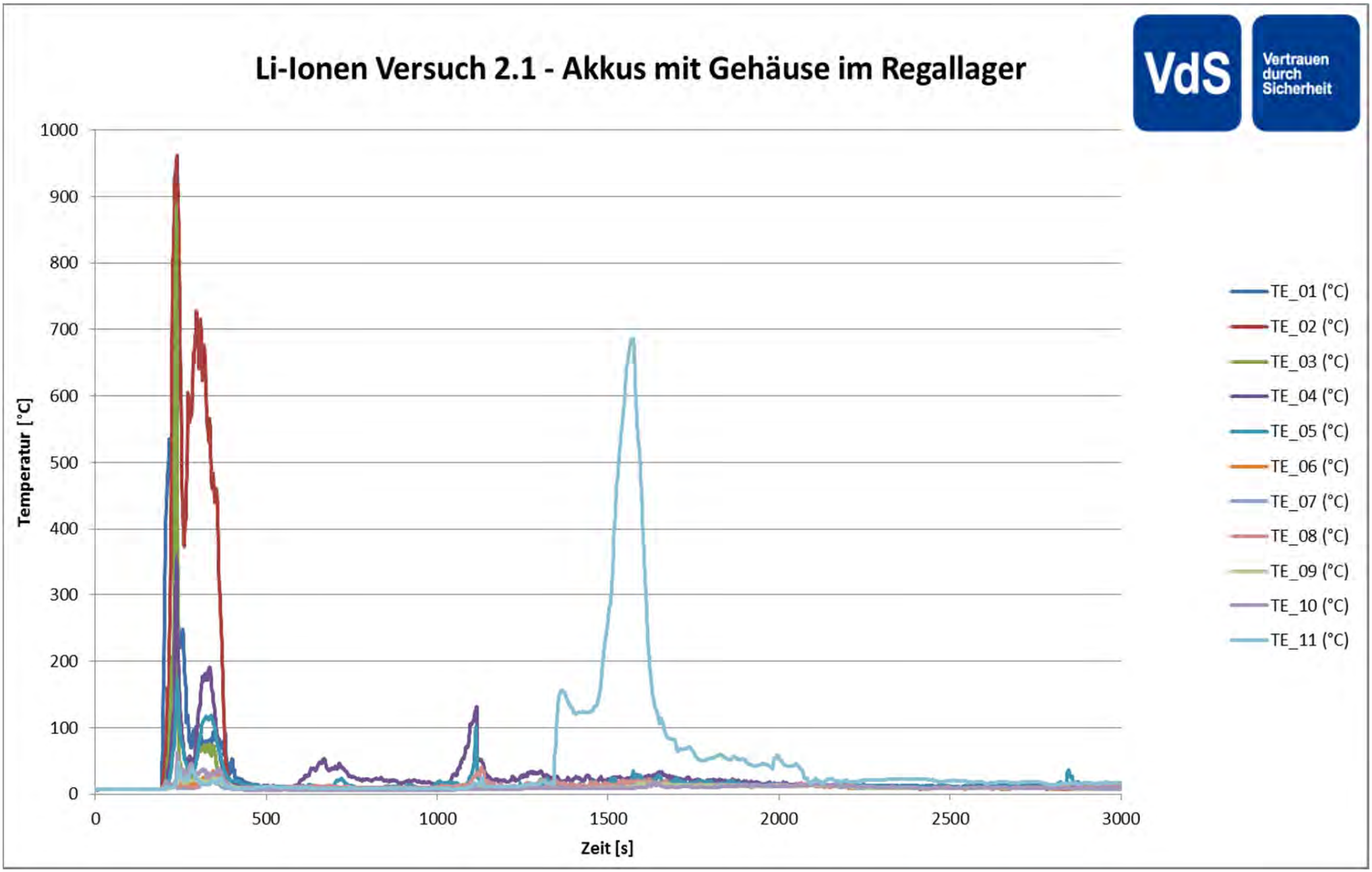


Li-Ionen Versuch 1. 2 - Akkus ohne Gehäuse, diagonal im Blocklager

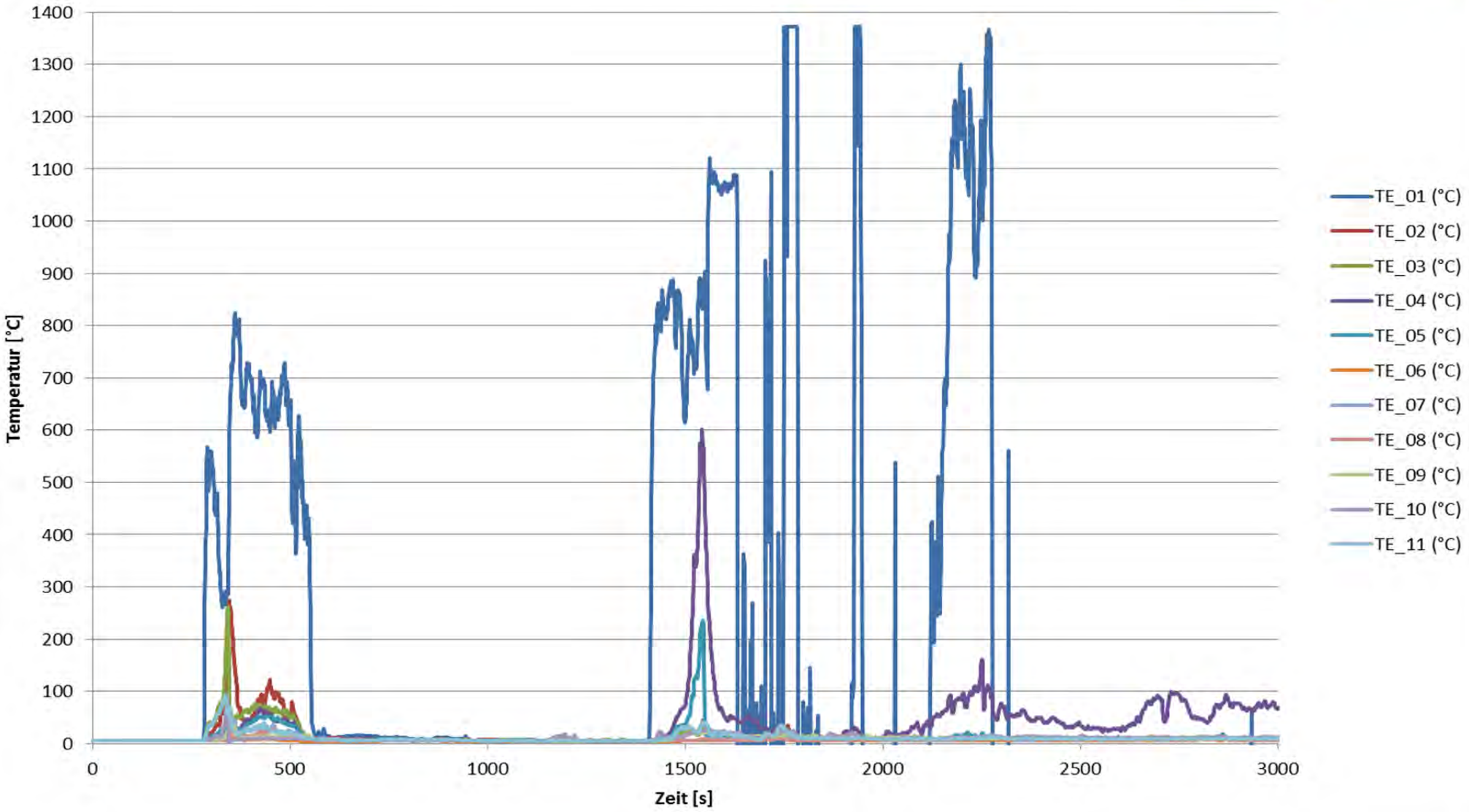


Li-Ionen Versuch 1.3 - Akkus ohne Gehäuse an Innenkanten im Blocklager




Li-Ionen Versuch 2.1 - Akkus mit Gehäuse im Regallager
VdS
Vertrauen durch Sicherheit
Temperatur [°C]
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Zeit [s]
TE_01 (°C)
TE_02 (°C)
TE_03 (°C)
TE_04 (°C)
TE_05 (°C)
TE_06 (°C)
TE_07 (°C)
TE_08 (°C)
TE_09 (°C)
TE_10 (°C)
TE_11 (°C)

Li-Ionen Versuch 2.2 - Akkus ohne Gehäuse im Regallager (2 Zündungen)



Anhang C – Beschreibung der Messgeräte

Temperaturmessgeräte

Messaufnehmer:	Mantelthermoelemente Typ K (NiCrNi), Durchmesser 1,0 mm,
Messbereich:	ca. −270 °C bis 1372 °C
Messunsicherheit:	Klasse 2 entsprechende EN60584, (± 2,5 °C)

Messdatenerfassung

Messsoftware:	SignaSoft 6000, Hersteller Peekel Instruments
Messausgabe:	Textdatei (ASCII-Format)