

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Schlussbericht des VDE Prüf- und Zertifizierungsinstituts zum Projekt SLIB

## Sicherheit von Li-Ionen-Batterien

Förderkennzeichen: 03X4605B

Laufzeit des Vorhabens:

01.05.2010 - 30.09.2014

Firma: VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH

Adresse: Merianstraße 28, 63069 Offenbach

Autor: Christian Kluth

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) gefördert und vom Projektträger Jülich betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
KURZE DARSTELLUNG ZU .....	2
1 Aufgabenstellung .....	2
2 Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
4 Wissenschaftlicher und Technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	7
EINGEHENDE DARSTELLUNG .....	8
5 Erzieltes Ergebnis .....	8
6 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses .....	31
7 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	32
8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc. ....	32



## KURZE DARSTELLUNG ZU

### 1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts ist die Prüfung und Untersuchung der Sicherheitskonzepte heutiger und zukünftiger Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) und der Aufbau von Prüfkompetenz zur Durchführung von Sicherheitsprüfungen an LIBs. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen zurück in die Batterieentwicklung sowohl beim Hersteller als auch bei der Normungsarbeit. Damit wird in Zukunft ein hohes Maß an Sicherheit durch unabhängige Prüfung und Zertifizierung ermöglicht. Diese Zielstellung wurde durch die beiden Projektpartner VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH nachfolgend (VDE-PI) und der Batterieabteilung des Zentrum für Sonnenenergie – und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW) bearbeitet.

Durch Vorgabe der Prüf- und Zertifizierungsmodalitäten seitens der deutschen Batterieindustrie und der führenden deutschen Testhäuser besteht die Chance, diese Ergebnisse weltweit zu einem Standard zu machen und einen Entwicklungsvorsprung im Bereich großer Lithium-Batterie-Systeme, die einen immer höheren Stellenwert einnehmen, zu erzielen.

#### 1.1 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Teilprojektes des VDE-PI

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des VDE-PI konzentrieren sich im Rahmen dieses Projektes auf Fragen der Sicherheit auf Modul und Batterieebene.

Die Notwendigkeit der Betrachtung dieser Sicherheitsaspekte ergibt sich aus den durch den Zusammenbau von Einzelzellen zu Modulen und Batterien thermischen und mechanischen Herausforderungen. Durch die Reihenschaltung von Zellen ergeben sich heute Betriebsspannungen im berührungsgefährlichen Bereich (>60 DC). Dies stellt erweiterte Anforderungen an die Isolationsanforderung. Durch die Betrachtung und Erarbeitung von Anforderungen im Rahmen des Projektes werden die Gefahren im späteren Einsatz minimiert. Aufgrund des auf den Anwendungszweck optimierten mechanischen Aufbaus von Modulen und Batterien müssen solche Untersuchungen an mehreren unterschiedlichen Modulen und Batterien durchgeführt werden um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Das VDE-PI war an den folgenden Arbeitspaketen 1.1 – 1.13 beteiligt:

#### 1.2 AP1.1 Abstimmung und Vornorm

Die Aufgabenstellung im Arbeitspaket 1.1 ist es, Erfahrungen und Kenntnisse aus dem Bereich der Mitarbeit in der Normung auf dem Gebiet der Sicherheitsanforderungen für Batterien sowie bisherige Erfahrungen aus dem praktischen Prüfbetrieb bei kleinen Li-Ionen Zellen und Batterien einzubringen. Insbesondere sind hier Erfahrungen im Bereich der praktischen Prüfung an kleinen Zellen und Batterien nach unterschiedlichen Normen und Vorschriften (IEC, UL und UN Transportnorm) zu nennen, bei denen die VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH über mehrere Jahre bereits Erfahrung gesammelt hat. Der Erfahrungsaustausch mit dem Projektpartner ZSW dient zur Nutzung einer einheitlichen Sichtweise auf deren Basis bestimmt werden soll, ob die in der Vornorm spezifizierten Prüfungen vom rein theoretischen Ansatz her ausreichend sind.

#### 1.3 AP1.2 Ermittlung Prüfanforderungen

Im Ergebnis des AP 1.1 werden die Prüfungen basierend auf der Vornorm VDE 0510 Teil 11 sowie weiterer Bestimmungen, Verordnungen und Erfahrungen identifiziert. Im Rahmen des AP 1.2 werden die genauen Prüfanforderungen für diese Prüfungen definiert. Im Rahmen der Vorplanung zu dem Projekt wurden die folgenden Prüfungen als relevant und notwendig erkannt und werden vom VDE-PI durchgeführt:

- elektrische Sicherheit
- Zyklisieren der Batterien
- thermische Belastung



- Umweltbelastung bei Transport im LKW, im Zug oder Flugzeug
- mechanische Belastung bei Transport im LKW, im Zug oder Flugzeug

#### 1.4 AP1.3 Definition Prüfmittel

Im Ergebnis des AP 1.2 werden Prüfanforderungen definiert. Im Rahmen des AP 1.3 werden die für die Realisierung der Prüfungen notwendigen Prüfmittel definiert. Die in dem Projektantrag aufgeführten Investitionen werden basierend auf den aus AP 1.1 und AP 1.2 gewonnenen Erkenntnissen ggf. modifiziert und ggf. aktualisierte Angebote eingeholt.

#### 1.5 AP1.5 Vervollständigung der Prüfplätze

Im Rahmen von Arbeitspaket 1.4 werden die angeschafften Prüfmittel installiert und komplettiert, so dass die Prüfungen nach der in AP 1.6 erfolgten Kalibrierung und Justage an den im Projekt zu beschaffenden Prüfmustern durchgeführt werden.

#### 1.6 AP1.6 Kalibrierung und Justage

Nach Installation und Justage der neu angestellten Prüfmittel ist eine Kalibrierung notwendig, um die Prüfungen unter vergleichbaren Bedingungen und rückführbar durchführen zu können. Diese Justage und Kalibrierung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Projektleiter durch die hauseigene Kalibrierstelle. Absprache und Koordination der Lieferung der Batteriezyklisierer erfolgt mit dem Hersteller.

#### 1.7 AP1.7 Optimierung der Prüfung

Im Arbeitspaket Optimierung der Prüfung sollen die in AP2.1 und AP 1.2 definierten Prüfungen an denen im Rahmen von AP 1.13 von der Batterieindustrie zur Verfügung gestellten Prüfmustern durchgeführt und im praktischen Versuch die Anwendbarkeit sowie die Validität der Ergebnisse geprüft werden. Im Laufe des Projektes sollen aus den dann jeweils am Markt befindlichen Batterien dann passend zu den Arbeitspaketen ausgewählt werden. Die Batterien werden durch die Batterieindustrie zur Verfügung gestellt. Um eine valide Aussage über unterschiedliche Batterieklassen (Spannungsklasse, Gewichtsklasse, Stromklasse etc.) und Anwendungsbereichen (Fahrzeuggatterie, stationäre Batterie) machen zu können sind mindestens 4 Batterien pro Klasse und Anwendungsbereich zu beschaffen. Im Einzelnen wird dazu die elektrische Sicherheit durch nachfolgende Prüfungen ermittelt. Zum einen durch den Berührungsschutz über die Anwendung von genormten Prüffingern und Prüfstiften. Dazu werden die Prüfmittel an allen berührbaren Oberflächen und Kontakten der Batterien angesetzt. Zum anderen werden Schutzartprüfungen gegen das Eindringen von Feuchtigkeit und Staub durchgeführt. Ziel hierbei ist die minimale Schutzart für Batterien der unterschiedlichen Anwendungen zu definieren. Dazu werden verschiedene Schutzartprüfungen entsprechend dem IP Schutzcode durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Die Ergebnisse werden in die Normung eingespeist um diese ggf. an die Anforderungen der Praxis anzupassen.

Weiterhin wird untersucht ob übliche Materialprüfungen an Konstruktionsmaterialien im Kontakt mit elektrisch leitfähigen Teilen, wie den Glühdrahtprüfung, Flammprüfung, Kugeldruckprüfung und Kriechstromfestigkeit, für den Einsatz bei den unterschiedlichen Batterieanwendungen notwendig sind. Um verlässliche und vergleichbare Grundvoraussetzungen zu erreichen, ist es notwendig die Batterien einer Vorbehandlung in Form von Zyklisierungen auszusetzen. Für diesen Arbeitsschritt ist eine besondere Prüfeinrichtung, welche in AP 1.3 bis AP 1.6 angeschafft und einsatzbereit gemacht wurde, notwendig. Aufgrund der im Rahmen des Projektes zu betrachtenden Batterieklassen ist ein Gerät mit 1000 V DC und min. 500 A Stromergiebigkeit ausgewählt worden. Nach den derzeit geltenden Vorschriften sind Li-Ionen Zellen bzw. Batterien der Gefahrgutklasse zugeordnet.



Aus diesem Grund dürfen serienmäßig produzierte Zellen bzw. Batterien nur nach bestimmten Transporttests (siehe UN Transportvorschriften Abschnitt 38.3) auf öffentlichen Straßen, per Flugzeug oder Schiff befördert werden. Folgende Prüfungen nach UN 38.3 sind zu bestehen:

- T1 Höhensimulation
- T2 Temperaturzyklusprüfung
- T3 Vibration
- T4 Schockprüfung
- T5 Externer Kurzschluss
- T6 Schlag
- T7 Überladung
- T8 erzwungene geförderte Entladung

## **1.8 AP 1.8 Definition neuer Anforderungen an LIB**

Basierend auf den Erkenntnissen der in AP 1.7, AP 1.10 und AP 1.12 durchgeführten Prüfungen werden ggf. neue Anforderungen an Li-Ionen Zellen und Batterien für die im Projekt betrachteten Batterieklassen erarbeitet. Nach Abstimmung der neuen Anforderungen mit unserem Projektpartner ZSW werden die Vorschläge in die Normung eingebracht. Die Erarbeitung der Vorschläge inkl. Prüfkonzept und die Einbringung dieser in den Normungsprozess sind sehr zeitaufwändig.

## **1.9 AP 1.9 Integration Ergebnisse in die Normen**

Die in AP 1.8 erarbeiteten Vorschläge werden ausformuliert und als Änderungsvorschläge in die Normung eingebracht. Bearbeitung von der Norm-Vorlage bis hin zum Norm-Entwurf. Die vorgesehene Fassung einer Norm muss vor ihrer endgültigen Festlegung der Öffentlichkeit zur Stellungnahme vorgelegt werden. Die Erarbeitung eines zu veröffentlichenden Norm-Entwurfes erfolgt auf Basis eines dem Normungsantrag beigefügten Vorschlags, oder aber einer von einem Expertenkreis zu erarbeitenden ersten Norm-Vorlage. In jedem Fall ist der Antragsteller zur Behandlung seines Normungsantrages als Gast einzuladen, um seinen Antrag vor dem zuständigen Arbeitsausschuss zu vertreten; er kann auch als Mitarbeiter aufgenommen werden. Entsprechend den Beratungsergebnissen im zuständigen Arbeitsausschuss werden überarbeitete Versionen der Norm-Vorlage erstellt. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erlangten Erkenntnisse fließen in Bezug auf die mobilen Anwendungen in die Normung bei ISO ein. Dazu wird der s. g. Maintenance Zyklus verwendet in dem existierende Normen auf Ihre Aktualität überprüft werden und ggf. existierende Anforderungen geändert und ggf. neue Anforderungen hinzugefügt werden. Ein Maintenance Zyklus einer Norm beträgt zwischen 3 und 5 Jahren. Die Ergebnisse der Arbeiten werden also unter Beratung der beteiligten Kreise in den nächsten Maintenance Zyklus der entsprechenden Normen einfließen.

## **1.10 AP 1.10 Prüfung LIB Mobil**

Im AP 1.10 erfolgt dann die eigentliche Prüfung von mobilen Batterien nach den schon in AP 1.7 dargestellten und aufgelisteten Prüfschritten unter Einsatz der vorhandenen sowie der neu angeschafften Prüfmittel.



### **1.11 AP 1.11 Prüfung LIB Transport**

In diesem AP werden die in AP 1.7 aufgeführten Anforderungen nach UN Transportvorschriften abgeprüft und ggf. aufgezeigt ob und wo für heutige Batteriekonstruktionen für den gedachten Anwendungsbereich Grenzen erreicht oder gar überschritten werden. Dabei wird ggf. unter Einbeziehung der Batteriehersteller ausgelotet in wie weit ggf., basierend auf den Ergebnissen aus den Prüfungen, versucht werden müsste diese Anforderungen zu modifizieren ohne den Sicherheitsaspekt aus den Augen zu verlieren. Diese Arbeiten sollen die Grundlage von Vorschlägen an die Arbeitsgruppe der UN dienen, welche sich mit der Überarbeitung der UN Transportvorschriften befasst.

### **1.12 AP 1.12 Prüfung LIB stationär**

In diesem AP erfolgt die eigentliche Prüfung von stationären Batterien nach den schon in AP 1.7 dargestellten und aufgelisteten Prüfschritten unter Einsatz der vorhandenen sowie der neu angeschafften Prüfmittel. Dabei werden die unterschiedlichen Anforderungen an stationäre Batterien, welche in AP 1.1 und AP 1.2 ausgearbeitet wurden, berücksichtigt.

### **1.13 AP 1.13 Beschaffung der erforderlichen Batterien, um die Prüfungen durchzuführen**

Die Beschaffung von Batterien entsprechend der unter Tabelle 1 geclusterten Prüfmuster für die einzelnen Phasen der Prüfungen ist eine zentrale Aufgabe, der eine hohe Bedeutung zugemessen werden muss. In Frage kommende Hersteller haben heute keine serienreifen Batterien in den entsprechenden Größen verfügbar sondern i. d. R. nur Prototypen. Es muss u. a. versucht werden durch Kontakt mit anderen geförderten Konsortien innerhalb des Förderprogramms LIB 2015 entsprechende Batterien zu akquirieren.

## **2 Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde**

Der VDE – Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V. – mit Sitz in Frankfurt/Main wurde im Jahr 1893 als gemeinnütziger Verein von der Industrie gegründet. Der Verband gliedert sich in die Sparten Wissenschaft, Bildung und Beruf (WBB), Normung und Standardisierung (DKE), Prüf- und Zertifizierungsinstitut (VDE-PI) und das Verlagswesen (VDE-Verlag). Das im Jahre 1920 gegründete Prüf- und Zertifizierungsinstitut in Offenbach führt Produktprüfungen an Geräten der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik durch und zertifiziert Qualitätsmanagement-Systeme. Im Auftrag des Herstellers kann bei Nachweis der Konformität des Produktes mit relevanten Normen und dem Stand der Technik sowie nach der erfolgreichen Auditierung der Fertigungsstätte das VDE-Prüfzeichen vergeben werden, welches auch außerhalb Europas ein hohes Ansehen hat. Das VDE-PI beteiligt sich seit Jahren aktiv im Komitee K 371 der Deutschen Kommission Elektrotechnik (DKE im DIN und VDE) an der Normung von Batterien. Darüber hinaus prüft das VDE-PI seit mehreren Jahren nach einschlägigen Normen (DIN EN, IEC, UL) Batterien und Zellen für tragbare Geräte und hat sich dadurch Erfahrung mit dem Umgang auch Li-/Li-Ion- haltiger Zellen und Batterien erarbeitet. Im vergangenen Jahr wurde in Bezug auf Li-Ionen Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge auch Kontakt mit dem VDA aufgenommen um eine Koordinierung der Normungsarbeiten zwischen den Organisationen zu initiieren. Betrachtet man die bisherige Prüftätigkeit beim VDE-PI, so stellt man fest, dass insbesondere bei den Li-/Li-Ion-haltigen Zellen und Batterien besondere Sicherheitsvorkehrungen zu treffen sind, da diese bei schlechter Konstruktion dazu neigen bei den Prüfungen zerstört zu werden. Das Zerstörungspotential sowie der Zeitpunkt der Zerstörung kann je nach Prüfung unterschiedlich sein. Es können Beobachtungen zwischen exothermen Reaktionen viele Stunden bis zu Tage nach der Prüfung und verpuffungsartiger Zerstörung direkt nach Überladungen von Zellen und Batterien gemacht werden. Für kleine Geräte-Zellen und -Batterien sind die Anlagen des VDE-PI ausgelegt die Sicherheit für Prüfpersonal, die



Prüfanlagen und der Umwelt zu gewährleisten. Weiterhin können durch die Vorkenntnisse und Vorarbeiten im Rahmen der Vornorm DIN V VDE V 0510-11 dazu führen, Technologieführerschaft hinsichtlich Sicherheit und Qualität auszubauen. Außerdem werden die aus den Untersuchungen und Prüfungen gewonnenen Ergebnisse die Umsetzung der nationalen Vornormen in Internationale Normen (IEC) und Europäische Normen (EN) untermauern. Es ist zu erwarten, dass die beteiligten Unternehmen – auch durch die Möglichkeit der Prüfung und Zertifizierung ihrer LIBs – Marktvorteile nutzen und ausbauen können. Durch die Erarbeitung von Sicherheitsanforderungen für den Transport sowie für den Einsatz von LIBs in stationären Anwendungen werden neue Sicherheitskonzepte erwartet, die in internationale Standards einfließen.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde wie geplant durchgeführt. Die Arbeitsplanung sieht vier Arbeitsschienen vor. Die praktischen Arbeiten an den Zellen und Batterien wurden in den Arbeitsschienen „Realisierung“, „Prüfung“ und „Sicherheitskonzept“ durchgeführt. In der Arbeitsschiene „Realisierung“ wurden Maßnahmen zur Umsetzung von Sicherheits- und Prüfanforderungen realisiert. In der Arbeitsschiene „Prüfung“ wurden repräsentative und neuartige LIBs für zukünftige Märkte geprüft. Dabei wurden die Prüfungen stetig optimiert. Die Erfahrungen aus der Arbeitsschiene „Prüfung“ liefen in die Schiene „Sicherheitskonzept“ ein und wurden dort – geführt durch einen gemeinsamen Arbeitskreis DKE / VDA – in die Überarbeitung der existierenden bzw. kurz vor der Veröffentlichung stehenden Normen eingespeist.

Eine große Herausforderung stellte die Verzögerung des Baus des Batterietestzentrums dar. Der Neubau wurde erst im Jahr 2012 fertig gestellt. Folglich gab es eine Verschiebung in der Abarbeitung der Arbeitspakete und eine Unterschreitung der geplanten Kosten. Durch die kostenneutrale Verlängerung konnte das Projektziel aber dennoch innerhalb der Projektlaufzeit erreicht werden.

Ein weiteres Problem lag in der Beschaffung der Prüfmuster. Die Projekt- und Kostenplanung war darauf ausgelegt, die Prüfungen an einigen verschiedenen Batterietypen durchzuführen. Es erklärten sich aber nur wenige Hersteller bereit, Prüfmuster zur Verfügung zu stellen. Insgesamt erhielt das VDE-PI nur vier Typen für das Projekt. Daher wurden weniger Tests als geplant durchgeführt. Der Zell- und Batteriehersteller ECC-Repennig konnte die eingeplanten Prüfmuster nicht zur Verfügung stellen und hat sich komplett aus dem Projekt zurückgezogen.

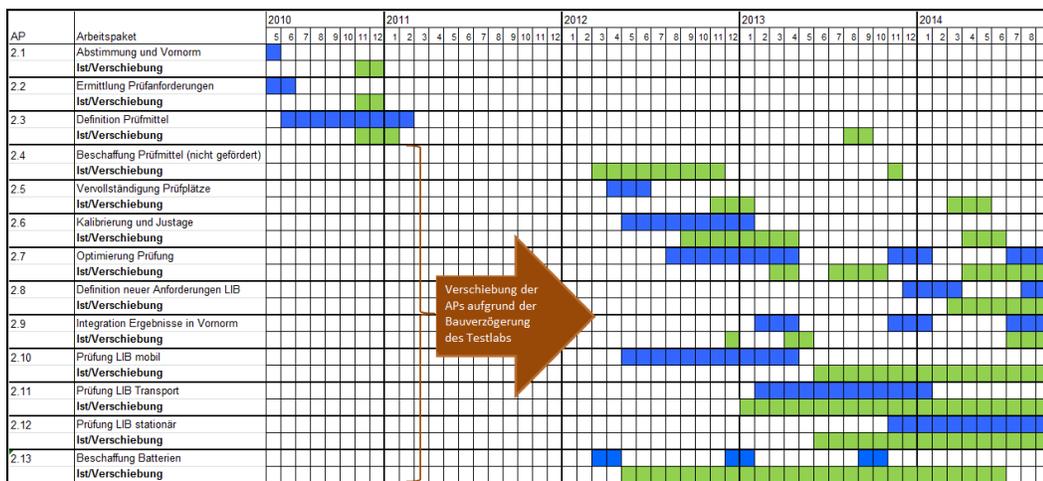


Abbildung 1 Arbeitsplan mit Angabe der Arbeitspakete.



Abbildung 2 Meilenstein-Erreichung SLiB

## 4 Wissenschaftlicher und Technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die LIB-Technologie ist gekennzeichnet durch hohe Energiedichten, Langlebigkeit und geringes Gewicht. Weltweit wird diese Technik z. Zt. im Bereich der Unterhaltungselektronik bzw. Bürokommunikation eingesetzt. Sie stellt heute in Deutschland eine Schlüsseltechnologie für Anwendungen im mobilen als auch stationären Einsatz dar. In Deutschland findet gegenwärtig keine Großserienfertigung von LIBs für automobile oder stationäre Anwendungen statt, erste Vorserienfertigungen aufgrund des großen Entwicklungspotenzials befinden sich im Aufbau. Ein großes Marktpotenzial besteht für Autos mit Hybridantrieb (hybrid electric vehicles, HEVs) und Elektrofahrzeuge (electric vehicles, EVs). Als Schlüsselkomponente für diese Fahrzeuge ist der Energiespeicher anzusehen, für den sich auf Grund der notwendigen hohen Energie- und Leistungsdichten die Li-Batterietechnologie anbietet. Das erste serienmäßige HEVs mit Li-Ionen-Akkumulatoren kommt 2009 von Daimler mit dem S400 auf den Markt. Aufgrund des erhöhten Bedarfs an Energie und Leistung werden die zukünftigen LIBs an Masse und Volumen zunehmen; hieraus resultiert ein wesentlich erhöhtes Gefahrenpotential. Um die Ströme und elektrischen Verluste in beherrschbare Größenordnungen zu bekommen, erfolgt die Realisierung derartiger Energiespeicher auf höheren Spannungsebenen als bisher üblich, woraus sich besondere Anforderungen an die elektrische Isolation, an den Berührungsschutz, Isolationswiderstand, an die Spannungsfestigkeit von elektrischen Bauteilen, Schalt- und Verbindungselemente ergeben. Neben dem Einsatz von LIBs in mobilen Straßenfahrzeugen ist die Lithium-Batterie-Technologie ebenfalls eine attraktive Energiequelle für elektrisch betriebene Wasser- und Unterwasserfahrzeuge, bemannte und unbemannte Transportsysteme, USV-Anlagen, stationäre Speicher für die Photovoltaik (PV) sowie zur Speicherung von Regenergie in bspw. Windenergieanlagen. Eines der Hemmnisse für die Einführung der Lithium-Batterie-Technologie in Großanlagen ist der derzeit hohe Preis. Trotz großen Optimierungspotentials durch kostengünstige Materialien, verbesserte Fertigungsverfahren und die Skaleneffekte der zukünftigen



Massenfertigung wird es auch in Zukunft eine hochpreisige Technologie bleiben. Die mögliche hohe Zyklenzahlen sowie die Wartungsfreiheit der Zellen ermöglichen jedoch unter dem Strich günstige Systemkosten. Für beide Anwendungsbereiche ist das Thema Sicherheit eines der Hauptargumente für die zurückhaltende Entwicklung (insbesondere in der automobilen Anwendung) dieser Zukunftstechnologie.

Eines der Hemmnisse für die Einführung der Lithium-Batterie-Technologie in Großanlagen ist der derzeit hohe Preis. Trotz großen Optimierungspotentials durch kostengünstige Materialien, verbesserte Fertigungsverfahren und die Skaleneffekte der zukünftigen Massenfertigung wird es auch in Zukunft eine hochpreisige Technologie bleiben.

## EINGEHENDE DARSTELLUNG

### 5 Erzieltes Ergebnis

#### 5.1 AP 1.1 Abstimmung und Vornorm

Im Arbeitspaket 1.1 wurden die folgenden Normen einem Vergleich unterzogen:

- UN 38.3 Transporttest
- IEC 62660-2: Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles
- ISO 12405-1 und ISO 12405-2: Electrically propelled road vehicles -
- Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems
- BATSO
- SAE J2464: Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing

Die genannten Normen wurden verglichen und daraus die Prüfanforderungen aus AP1. 2 abgeleitet. Die Projekt-Partner VDE-PI und ZSW sind übereingekommen, dass als Grundlage für die unmittelbare Batteriesicherheitsuntersuchungen folgende Vorschriften, Normen und Richtlinien für das Projekt verwendet werden:

Für Zellprüfungen:

#### **IEC 62660-2**

Vibration, mech. Schock, Quetschtest, Hochtemperaturbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, externer Kurzschluss, Überladung, Überentladung

#### **UN 38.3 Transport**

Höhensimulation, Temperaturwechselbeständigkeit, Vibration, mech. Schock, externer Kurzschluss, mech. Impact, Überladung, Überentladung

Für Batterieprüfungen:

#### **ISO 12405-3**

Betaungstest, Temperaturwechselbeständigkeit, Vibration, mech. Schock, externer Kurzschluss, Überladung, Überentladung

#### **BATSO**

Höhensimulation, Temperaturwechselbeständigkeit, Vibration, mech. Schock, externer Kurzschluss, Mech. Impact, Überladung, Überentladung



### UN 38.3 Transport

Höhensimulation, Temperaturwechselbeständigkeit, Vibration, mech. Schock, externer Kurzschluss, Mech. Impact, Überladung, Überentladung

### SAE J2464

Es wurde ein Vergleich der Normen und Bestimmungen angestellt, um die Unterschiede und Übereinstimmungen zwischen diesen feststellen zu können. Daraus und aus den Anwendungsfeldern der einzelnen Bestimmungen abgeleitet wurde eine Matrix erstellt, aus der die Anforderungen für die unterschiedlichen Batterieklassen hervor gehen. Die rein vergleichenden Betrachtungen haben ergeben, dass möglicherweise noch andere Bestimmungen untersucht werden müssen, um festzustellen, ob die Sicherheit grundsätzlich für diese Art von Batterien basierend auf den existierenden Bestimmungen gegeben ist.

Bei den ISO Bestimmungen wurde festgestellt, dass keine s.g. Pass/Fail Kriterien festgelegt sind, welche eine klare Aussage erlauben würden ob eine geprüfte Batterie den Anforderungen entspricht.

Im Berichtszeitraum ist die IEC 62660-2 und die ISO 12405-3 in Kraft getreten. Die UN 38.3 ist gültig in der Revision 5 mit der ersten Änderung. Die chinesische Norm QC/T743 ist nach wie vor in der Fassung 2006 gültig. In Bezug auf sicherheitsrelevante Software von Batteriemanagementsystemen sind in allen untersuchten Bestimmungen keine Anforderungen definiert. Dies kann als eine wesentliche Erkenntnis festgehalten werden. In Bezug auf stationäre Speicher konnte festgestellt werden, dass Anforderungen bzgl. des Auftretens toxischer Gase und Partikel unter Normalbedingung und dem Erstfehler fehlen.

## 5.2 AP1. 2 Ermittlung Prüfanforderungen

In diesem Arbeitspaket wurden auf Basis, der in den entsprechenden Normen definierten Absicherungstests die Bedarfe hinsichtlich dieses Projekts zusammengestellt. Konkret wurden die folgenden Tests mit entsprechenden Parametern bzw. Schlüsselprüfungen zur Durchführung selektiert:

- **Kurzschluss:**
  - Ladezustand: 100% SOC
  - Umgebungstemperatur: 55°C
  - Externer Kurzschlusswiderstand:  $R=5\text{m}\Omega$  und  $R<0,1$
- **Überladeprüfung:**
  - Ladung: 200% SOC oder Überladespannung 200%, Umgebungstemperatur: 20°C
- **Thermischer Belastungstest:**
  - Ladezustand: 100% SOC
  - Umgebungstemperatur: 20°C
  - Erwärmung auf 130°C für 30 Minuten
- **Crush-Test:**
  - Ladezustand: 100% SOC
  - Umgebungstemperatur: 20°C
  - Gewichtskraft: 1000-faches Batteriegewicht
- **Schutzartprüfung / Berührungsschutz:**
  - Einstufung gemäß IP Schutzartklassen
- **Materialprüfung:**
  - Einstufung gemäß Brandschutzklassen der Materialien der Batterien
- **Sicherheitsfunktionen:**



- Prüfung der Schutzeinrichtungen
- **Isolationsprüfung:**
  - Spannungsüberprüfung an berührbaren Teilen (z.B. Gehäuse)
  - Isolationsprüfung vor und nach entsprechenden Tests

Ergebnis des Normenvergleichs sind die genannten Prüfungen. Um diese durchführen zu können, wurden die Anlagen aus AP 1.3,1.5, und 1.6 definiert, angefragt, bestellt, aufgestellt, in Betrieb genommen, kalibriert und justiert. Letztendlich wurden die in AP 1.10 -1.12 genannten Prüfungen mit diesen Mess- und Prüfeinrichtungen durchgeführt.

### 5.3 AP 1.3 Definition Prüfmittel / AP 5 Vervollständigung der Prüfplätze

Um die beschriebenen Prüfungen sicher und normativ richtig durchführen zu können, wurde das Testequipment im Rahmen des Projekts um folgende Mess-, Prüf- und Sicherheitseinrichtungen erweitert, siehe Tabelle 1. Zusätzlich zu dem Mess- und Prüfequipment wurden Sicherheitseinrichtungen wie z.B. N<sub>2</sub>- Inertisierungsanlage, Kameraüberwachung, CO<sub>2</sub> Löschanlage installiert und in Betrieb genommen, um Lithium Batterien sicher testen zu können.

Nr.	Anschaffungsgegenstand
1	Batteriezyklisierer 1000 V
2	Schockanlage
3	Vibrationsanlage
Zu 3	Regler für Software
4	Vakuumschrank
5	Abluftanlage
6+7	Quetscheinrichtung
8	Klimakammer
Zu 8	Software
9	Waage
10	Klimakammer zu Vibrationsanlage
11	Batteriezyklisierer 100 V
12	Inertisierungsanlage
13	Klimaanlage
14	Kameraüberwachung
15	CO <sub>2</sub> Löschanlage

**Tabelle 1: Übersicht über das Prüfequipment**

### 5.4 AP 1.6 Kalibrierung und Justage

Die neu angeschafften Mess- und Prüfeinrichtungen wurden bei der Inbetriebnahme bzw. Abnahme kalibriert. Seit dem werden sie in regelmäßigen Abständen nach normativer Vorgabe kalibriert und wenn nötig justiert. Je nach Art der Mess- und Prüfeinrichtung wird die Kalibrierung entweder extern (Hersteller oder externer Kalibrierdienst) oder durch unsere interne Kalibrierabteilung durchgeführt. Nach Abnahme der Anlagen durch Prüfer und die Kalibrierstelle wurden die Mitarbeiter geschult, um die neuen Anlagen bedienen zu können.



## 5.5 AP 1.7 Optimierung der Prüfungen

Das Ziel der Prüfungen ist es, möglichst viele Erkenntnisse zu gewinnen. Nachdem die durchzuführenden Prüfungen definiert worden sind, bestand die Aufgabe darin, die Prüfungen hinsichtlich der zu gewinnenden Erkenntnisse zu optimieren.

In diesem Kontext ist es wichtig zu erwähnen, dass bedingt durch eine problematische Beschaffung der Prüflinge nur eine begrenzte Anzahl für die entsprechenden Prüfungen zur Verfügung stand.

Eine Prüfungsoptimierung lässt sich auf zwei Arten durchzuführen:

1. Reihenfolge der Prüfungen optimieren (sofern möglich)
2. Optimale Auslastungsplanung der Prüfungsanlagen

## 5.6 AP 1.8 Definition neuer Anforderungen an LIB

Basierend auf der Analyse der bestehenden Normen und der durchgeführten Prüfungen wurden neue Anforderungen an Batterien für die Batterieklassen erarbeitet und als Vorschläge in die Normung eingebracht.

Folgende Anforderungen wurden festgelegt:

- Stationäre Speicher mit Lithium Batterien:
  - Nationale Ebene: VDE AR 2510-50 und 2510-2 sind durch den VDE-Verlag in gültiger Fassung veröffentlicht. Ab April 2015 werden dann die Einsprüche eingearbeitet, so dass ab Mitte 2015 die finale Version zur Verfügung steht.
  - Internationale Ebene: Der Entwurf wurde als IEC 62897 eingereicht, jedoch auf Grund des Umfangs abgelehnt. Deswegen werden die Anforderungen nun in zwei Bereiche aufgeteilt:
    - a) Allgemeiner Teil Speicher: IEC 62485 Teil 5
    - b) Spezielle Prüfungen an Lithium Batterien: Wird in die IEC 62619 (Sicherheit) und IEC 62620 (Performance) eingearbeitet.

## 5.7 AP 1.10 Prüfung LIB mobil

LIB mobil	Batterie A	Batterie B
1. Schutzartprüfung / Berührschutz/	✓	✓
2. Materialprüfung	✓	✓
3. Sicherheitsanforderungen	✓	✓
4. Isolationsprüfung	✓	✓
5. Externer Kurzschluss	✓	✓
6. Überladung	Module ohne Überladeschutz	
7. Thermische Belastung	✓	✓
8. Crushtest	✓	✓

**Tabelle 2: Übersicht über die Prüfungen bei den zu testenden Batterien**

LIB mobil	Batterie A	Batterie B
9. Schutzartprüfung / Berührschutz/	✓	✓
10. Materialprüfung	✓	✓



11. Sicherheitsanforderungen	✓	✓
12. Isolationsprüfung	✓	✓
13. Externer Kurzschluss	✓	✓
14. Überladung	Module ohne Überladeschutz	
15. Thermische Belastung	✓	✓
16. Crushtest	✓	✓

Tabelle 2 zeigt die durchzuführenden Prüfungen auf, welche an zwei verschiedenen Batterietypen umgesetzt wurden.

Im Folgenden werden die einzelnen Prüfungen dargestellt:

### 5.7.1 Schutzartprüfung / Berührungsschutz/ Materialprüfung

Schutzart	Batterie A	Batterie B
mindestens IP67	✓	Keine Angaben des Herstellers
Staubdicht	✓	✓
vollständiger Schutz gegen Berührung	✓	✓
Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen	✓	-

**Tabelle 3: Übersicht Schutzarten**

### 5.7.2 Materialprüfung

Batterie	Material
Batterie A	Metallgehäuse, Kunststoffe der Klassen V0 oder V1
Batterie B	Metallgehäuse, Kunststoffe (Zellhalter): keine Angabe

**Tabelle 4: Auflistung der verwendeten Materialien**

Die Batterien wurden einer Schutzartprüfung unterzogen bzw. die Herstellerangaben verwendet, falls der Hersteller die Prüfungen bereits hat durchführen lassen (s. Tabelle 3). Da die Batterien für den mobilen Einsatz vorgesehen sind, sind diese verstärkt Umwelteinflüssen ausgesetzt. So können wechselnde klimatische Bedingungen oder auch Verschmutzung die Sicherheit der Batterie beeinflussen. Die zum Bau der Batterien verwendeten Materialien wurden in Brandschutzklassen eingestuft. Ziel des Einsatzes von Metallen bzw. flammhemmenden und selbstverlöschenden Kunststoffen ist es, ein Ausbreiten von Hitze und Flammen einzudämmen, so dass im Fehlerfall nicht die gesamte Batterie / Speichersystem abbrennt.

### 5.7.3 Sicherheitsanforderungen

Die Prüfungen wurden mit den in Tabelle 4 aufgeführten Batterien durchgeführt. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden die verbauten Sicherheitskomponenten und Schutzeinrichtungen für bestimmte Fehlerfälle gegenübergestellt. Die Überprüfung der Wirksamkeit im Kontext der durchzuführenden Sicherheitsprüfungen soll mit den Prüfungen aus AP 1.10 -1.12 nachgewiesen werden.

		Batterie A	Batterie B
Schutzart	Überladung	X	X
	Überspannung	X	X



	Tiefentladung	X	X
	Übertemperatur	X	
	Untertemperatur	X	
	Überlast	X	X
	Kurzschluss	X	X
Schutzeinrichtungen	Schütze	X	
	Halbleiterschalter		X
	Schmelzsicherung	X	X
	BMS	X	X
	Temperaturüberwachung	X	X
	Strom/Leistungsüberwachung	X	X
	Zell/Batteriespannungsüberwachung	X	X

**Tabelle 5: Vergleich der Sicherheitskomponenten und Schutzvorkehrung der zu testenden Batterien**

#### 5.7.4 Isolationsprüfung

Mit dieser Isolationsprüfung wird getestet ob gefährdende Spannungen an berührbaren Teilen des Gehäuses anliegen. Sowohl vor als auch nach den entsprechenden (mechanischen) Prüfungen wird eine Isolationsprüfung durchgeführt. Ein positives Ergebnis (+) zeigt an, dass sowohl vor, als auch nach dem Test keine gefährdende Spannung detektiert werden konnte. Die folgende Tabelle 6 zeigt einen Überblick über die erzielten Ergebnisse auf.

	Test	Batterie A	Batterie B
Isolationsprüfung (vor und nach Test)	T1 Vakuumprüfung	+	+
	T2 Temperaturwechselprüfung	+	+
	T3 Vibration	+	+
	T4 Schock	+	+
	T5 Externer Kurzschluss	+	+
	T6 Externer Kurzschluss (SLIB stationär)	+	+
	T7 Thermische Belastung	+	+
	T8 Crush	+	

**Tabelle 6: Isolationsprüfung vor und nach entsprechenden Tests (+ = positiv)**

#### 5.7.5 Externe Kurzschlussprüfung

Zunächst wurde ein externer Kurzschluss an der Batterie B durchgeführt. Dieser Test wurde weiterhin in zwei Varianten bei einer inaktiven und einer aktiven Batterie durchgeführt. Beide Tests wurden mit einem sehr niederohmigen externen Kurzschlusswiderstand von 5mΩ und einer Umgebungstemperatur von 55°C ±5°C durchgeführt. Zunächst wird der Fall der inaktiven Batterie betrachtet. Zum Zeitpunkt t=20s wird der Kurzschluss eingeschaltet, was dafür sorgt, dass die Restspannung des Batteriemangagementsystems von ca. 0,85V auf 0V (Kurzschluss) einbricht, siehe Abbildung 3. Gleichzeitig kann man beobachten, dass das Rauschen im Stromsignal minimal zunimmt und nach Abschalten des Kurzschlusses (t=80s) wieder auf das ursprüngliche Level zurückfällt.



Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass weder ein zusätzlicher Stromfluss noch eine signifikante Temperaturerhöhung zu verzeichnen ist.

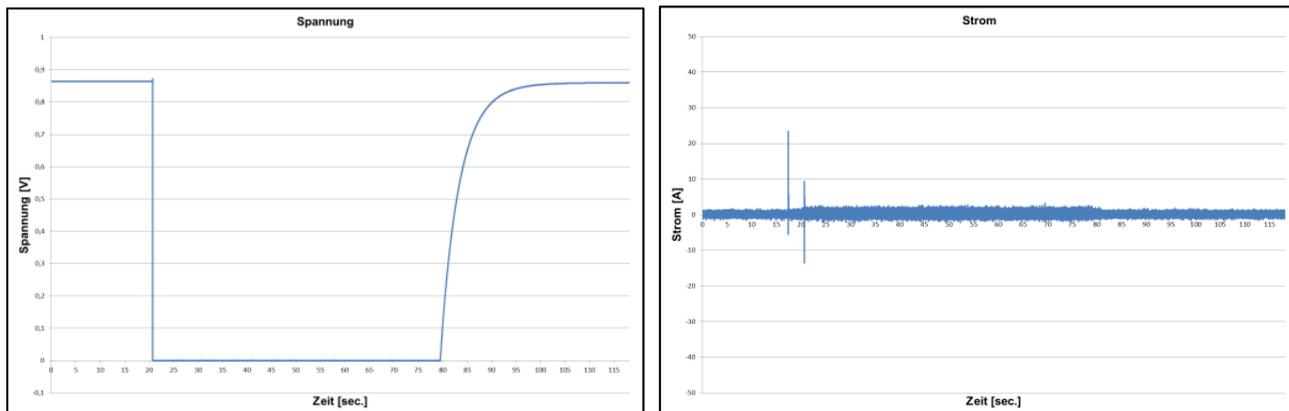


Abbildung 3: Strom und Spannungsverlauf externer Kurzschluss (5mΩ), Batterie B (Batterie inaktiv)

Der folgende Fall betrachtet den Kurzschluss bei einer aktiven Batterie. Vor dem Kurzschluss kann eine Spannung von ca. 52V gemessen werden, die dem definierten Ladezustand von 100% SOC entspricht. Der Kurzschluss wird hier bei einem Zeitpunkt von 91ms auf die Batterie aufgeschaltet und führt in Folge zu einem starken Spannungseinbruch (vgl. Abbildung 4). Für eine Dauer von 35ms ist ein sehr hoher Stromfluss im Bereich von 700A zu beobachten. Anschließend sinkt sowohl der Strom als auch die Spannung auf einen Wert von 0. Dieses Verhalten ist auf das Auslösen der Schmelzsicherung zurückzuführen.

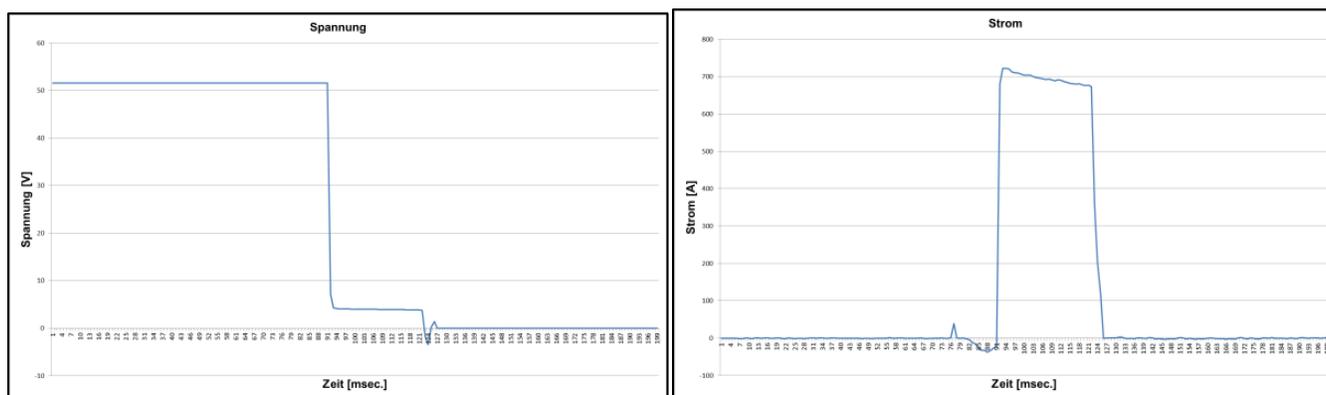


Abbildung 4: Strom und Spannungsverlauf externer Kurzschluss (5mΩ) Batterie B (Batterie aktiv)

Im Folgenden werden die Testergebnisse des externen Kurzschluss an der Batterie A im aktiven Zustand beschrieben:

Der Kurzschluss wird wie in den beiden vorangegangenen Test mit einem Widerstand von 5mΩ bei einer Umgebungstemperatur von 55°C durchgeführt. Zu Beginn des Tests liegt die volle Batteriespannung (entsprechend 100% SOC) an. Zum Zeitpunkt 80ms wird der Kurzschluss auf die Batterie aufgeschaltet. Der resultierende Strom erhöht und senkt sich stufig. Hervorzuheben ist, dass der maximale Strom lediglich 25A (im Vergleich zu 700A bei Batterie A) beträgt. Weiterhin ist zu nennen, dass die Zeit bis zum vollständigen Auslösen der Sicherung (200ms) nahezu 6x solange dauert wie beim Batterie B (~35ms). Der Verlauf des Stroms im beschriebenen Kurzschluss-Fall ist in Abbildung 5 zu sehen.

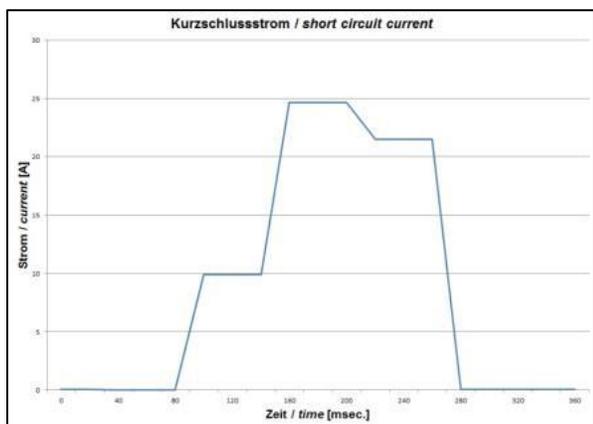


Abbildung 5: Stromverlauf externer Kurzschluss (5mΩ) Batterie A (Batterie aktiv)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anforderung aus der Norm (Externer Kurzschlusswiderstand 5 mOhm) von den von uns geprüften Batterien bzw. Modulen mit Sicherheitseinrichtungen (Schalteinrichtungen oder Sicherungen) auf dieser Ebene erfüllbar (vgl. UN38.3 Transporttest: Externer Kurzschlusswiderstand < 0,1 Ohm) ist.

### 5.7.6 Thermischer Belastungstest

Um die Robustheit der Batterien gegenüber Übertemperaturen abprüfen zu können, wird ein thermischer Belastungstest durchgeführt. Dazu wird der Prüfraum auf 130°C erhitzt und diese Temperatur anschließend für ca. 30min gehalten. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass beide Batterien diesen Test ohne Probleme bestehen. An der Batterie B sind Maximaltemperaturen von knapp über 100°C zu beobachten. Weiterhin kann ein signifikanter Unterschied bei der Temperaturverteilung über der Batterie festgestellt werden. Während T3 bei ~80°C liegt zeigen die Sensoren T2 und T4 Temperaturwerte knapp über 100°C, vgl. Abbildung 6. Aus Abbildung 7 geht der Temperaturverlauf bei identischer Testdurchführung für die Batterie A hervor. Man kann beobachten, dass die Maximaltemperaturen im Bereich von ca. 110°C liegen, während die Homogenität der Temperaturerhöhung bei dieser Batterie deutlich stärker ausgeprägt ist (Temperaturverteilung im Bereich 102-110°C). Weiterhin kann für beide Batterien festgehalten werden, dass weder ein Spannungseinbruch zu verzeichnen ist, noch irgendeine äußerliche Veränderung an den Batterien beobachtet werden konnten.

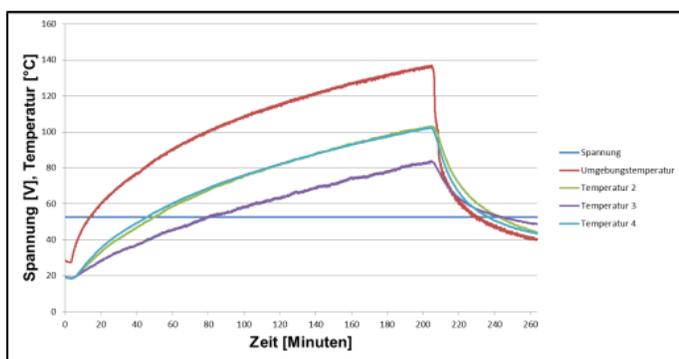


Abbildung 6: thermischer Belastungstest an Batterie B

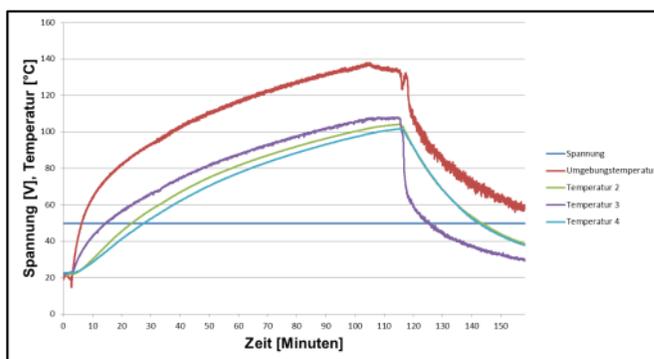


Abbildung 7: thermischer Belastungstest an Batterie A

Die Anforderung aus der Norm (Erwärmung bis 130°C) wurde von den von uns geprüften Batterien erfüllt. Es ist allerdings fraglich, ob diese Anforderung generell an mobil eingesetzte Batterien gestellt werden muss. Diese Anforderung macht aus unserer Sicht nur Sinn für Batterien, welche im Motorraum eines Verbrennungsmotors eingesetzt werden.

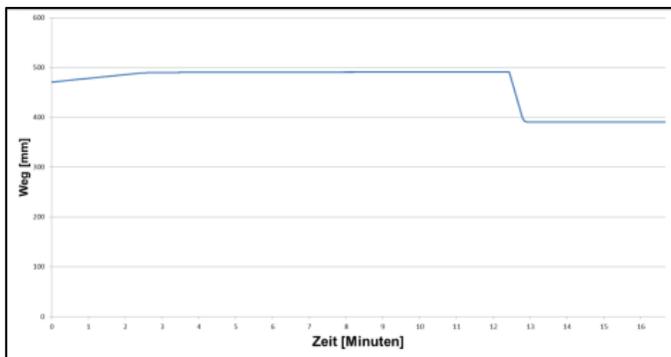


### 5.7.7 Crushtest

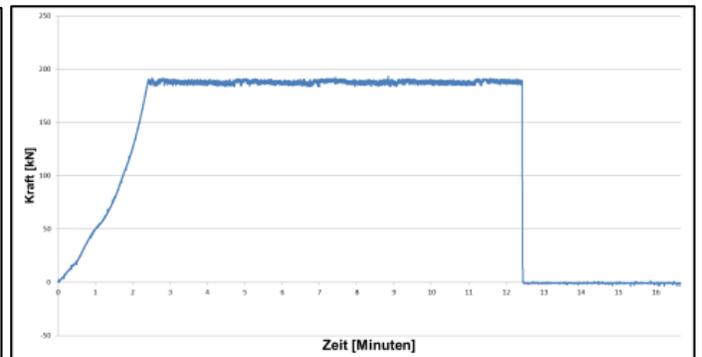
	Parameter	Abbruchkriterium
Schritt 1	Crush bis auf 85% der Originalhöhe Geschwindigkeit: 0,75 cm/Minute	Maximal 1000 fache Gewichtskraft
Schritt 2	Pause	Zeit > 5 Minuten
Schritt 3	Crush bis auf 50% der Originalhöhe Geschwindigkeit: 0,75 cm/Minute	Maximal 1000 fache Gewichtskraft
Angewendete Norm: SAE J2464 2009		

**Tabelle 7: Prozedur Crush-Test**

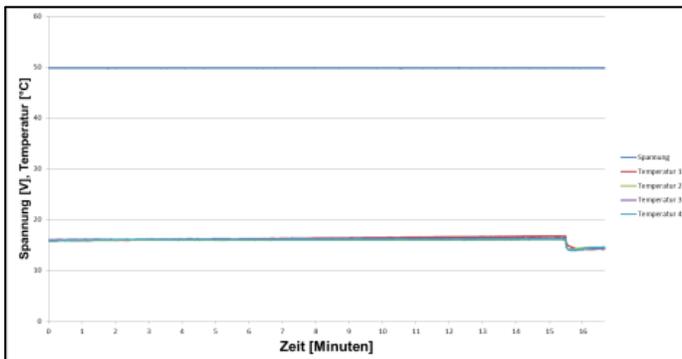
In Tabelle 7 wird ein Crushtest gemäß Prozedur an Batterie A dargestellt. In Abbildung 8 ist der Verlauf der angewendeten Kraft zu sehen, während in Abbildung 9 der Verlauf der Eindringtiefe dargestellt ist. Abbildung 10 beschreibt den Verlauf von Temperatur und Batteriespannung. Aus Abbildung 8 geht hervor, dass bereits während des ersten Verformungsschritts das Abbruchkriterium von der 1000fachen Gewichtskraft erreicht wird, somit werden Schritte 2 und 3 (volle Verformung) aus Tabelle 7 übersprungen. In Abbildung 10 wird deutlich, dass sowohl Temperatursensoren als auch die Zellspannung keine Reaktionen auf die Crush-Belastung zeigen. Zuletzt soll hervorgehoben werden, dass es darüber hinaus zu keinem thermischen Event wie Brand oder Explosion als Folge des Crush-Tests gekommen ist.



**Abbildung 8: Kraftverlauf bei Crushtest an Batterie A**



**Abbildung 9: Eindringdistanz-Verlauf bei Crushtest an Batterie A**



**Abbildung 10: Verlauf von Spannung und Temperatur bei Crushtest an Batterie A**

Zudem wurde eine Crushtest gemäß Prozedur, beschrieben in Tabelle 7, an der Batterie B durchgeführt. Hierbei ist festzustellen, dass die Batterie beide Verformungsschritte durchläuft und die maximale Kraft nicht erreicht wird. Im zweiten Verformungsschritt treten Kurzschlüsse auf, in dessen Folge sich die Batterie entzündet.

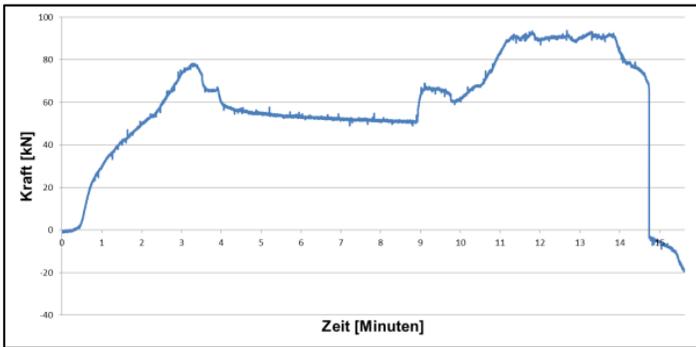


Abbildung 11: Kraftverlauf bei Crusstest an Batterie B

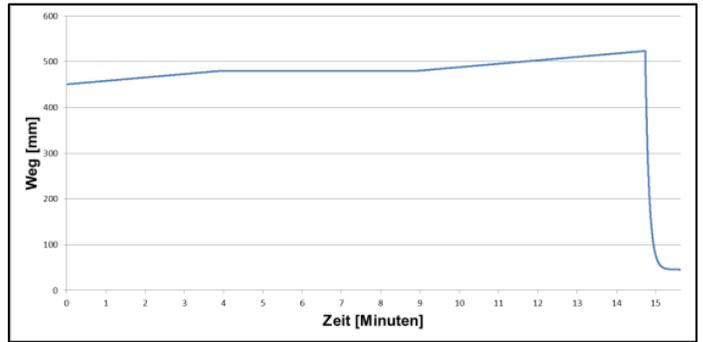


Abbildung 12: Eindringdistanz-Verlauf bei Crusstest an Batterie B

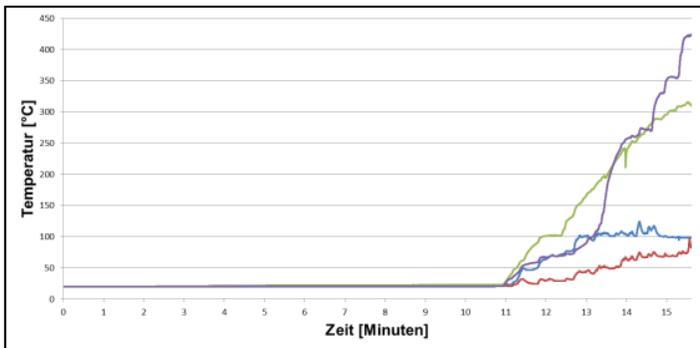


Abbildung 13: Verlauf von Spannung und Temperatur bei Crusstest an Batterie B

Die Anforderung aus der Norm (Crush bis 50% Verformung oder 1000-fache Gewichtskraft) wurde von dem Batterie A-Modul erfüllt, obwohl dieses nicht einzeln, sondern immer im Verbund und mit zusätzlichem Gehäuse eingesetzt wird. Die Batterie B hat den Crush-Test nicht bestanden. Da diese Batterie im Gegensatz zu den Batterie A-Modulen jedoch in Zweirädern eingesetzt wird, stellt sich hier die Frage ob die Anforderung für solch einen Einsatzzweck sinnvoll ist.

### 5.8 AP 1.11 Prüfung LIB Transport

LIB Transport	Stationär		Mobil	
	Batt. D	Batterie C	Batterie B	Batterie A
Zyklisierung	✓	✓	✓	✓
T1 Vakuumprüfung	✓	✓	✓	✓
T2 Temperaturwechselprüfung	✓	✓	✓	✓



T3 Vibrationsprüfung	✓	✓	wegen Sicherheitsrisiko nicht durchgeführt	✓
T4 Schockprüfung	✓	✓	Wegen Sicherheitsrisiko nicht durchgeführt	✓
T5 Externer Kurzschluss	✓	✓	✓	✓
T7 Überladung	✓	Module ohne Überladeschutz, daher nicht nötig. Auf Systemebene durchgeführt.	✓	Module ohne Überladeschutz, daher nicht nötig

**Tabelle 8: Testreihenfolge und Durchführung bei den unterschiedlichen zu testenden Batterien**

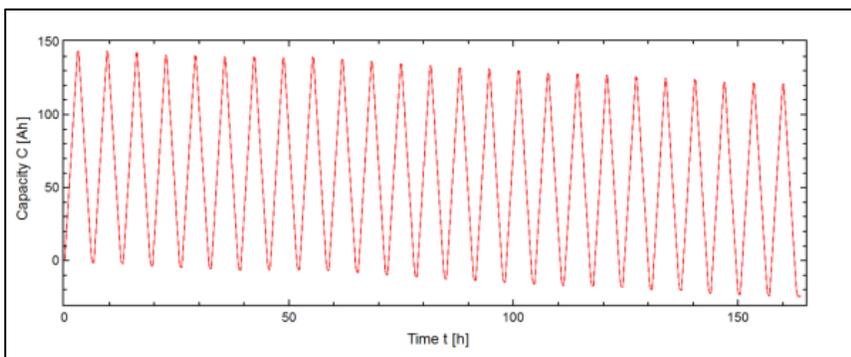
In diesem Arbeitspaket sollen die vorgegebenen Tests aus Tabelle 8 an den vier aufgeführten Batterien A-D, zwei Batterien aus dem stationären und zwei aus dem mobilen Sektor getestet werden. Es ist hervorzuheben, dass die Batterien einer kumulativen Belastung ausgesetzt sind, da der Test in sequentieller Reihenfolge durchlaufen wird. Im Folgenden werden die einzelnen Tests erläutert und die Ergebnisse für die Batterien diskutiert.

### 5.8.1 Zyklisierung

Vor den eigentlichen Transporttests (T1-T7, siehe Tabelle 8) soll eine Zyklisierung der Prüflinge gemäß den Vorgaben aus Tabelle 9 durchgeführt werden. Beispielhaft werden hier jeweils eine 25 Zyklen dauernde Zyklisierung an allen Batteriemustern gezeigt. Die Ergebnisse zeigen Abbildung 14 und Abbildung 15. Es sind keine Auffälligkeiten zu beobachten, folglich kann die initiale Zyklisierung bei allen Batterien als erfolgreich betrachtet werden.

Zyklisierung	
Masse Batterien	• > 12 kg
Anzahl Prüfmuster	• Gesamt: 4 Stück
Anzahl Zyklen	• 25 Zyklen (2 Batterien) • 1 Zyklus (2 Batterien)
Umgebungstemperatur	• Raumtemperatur (20°C +/-5°C)
Parameter	• Zyklisierung nach Herstellerangaben. • Zyklus entspricht Ein- und Entladen mind.der angegebenen Nennkapazität

**Tabelle 9: Parameter für initiale Zyklisierung im Kontext Transporttests**



**Abbildung 14: Exemplarische Zyklisierung an Batterie D (25Zyklen)**

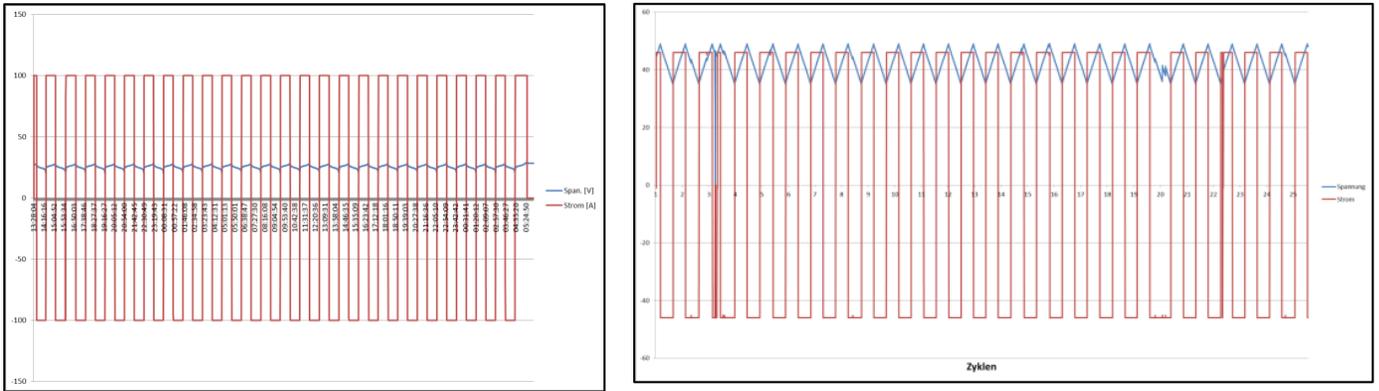


Abbildung 15: Exemplarische Zyklisierung an Batterie C (25Zyklen)

### 5.8.2 T1 Vakuumprüfung

Zunächst sollen die Batterien einer Vakuumprüfung unterzogen werden. Dies wird durchgeführt, um etwaige externe Unterdrucksituationen wie z.B. Transport der Batterie im Flugzeug als auch interne Überdrucksituationen wie z.B. Betrieb in höher gelegenen Bergregionen absichern zu können. Die Umgebungstemperatur sowie die weiteren Testparameter, als auch die Bestehenskriterien sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Ein beispielhafter Druckverlauf der Prüfung ist in Abbildung 16 dargestellt.

T1 Vakuumprüfung	
Anzahl Prüfmuster	• 4 Stück
Umgebungstemperatur	• Raumtemperatur (20°C +/-5°C)
Parameter	• 6 Stunden Lagerung bei 116 mbar.
Bestehenskriterien:	• Keine Undichtigkeit, Kein Masseverlust, Kein Öffnen, Keine Risse, Keine Zerlegung, Kein Feuer, Leerlaufspannung > 90%

Tabelle 10: Parameter und Bestehenskriterien für Vakuumprüfung (T1)

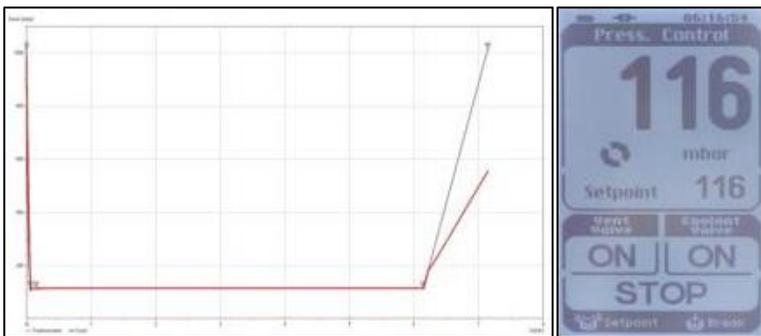


Abbildung 16: links: Beispielhafter Verlauf des aufgetragen über Zeit (7h), rechts: Foto von Prüfanlage zum Zeitpunkt des minimalen Drucks gemäß Prüfungsvorschrift

Zunächst kann festgehalten werden, dass wir die Anforderungen der Norm als sinnvoll und richtig erachten, da während des Transports im Flugzeug bei Reise Flughöhe von 12km ähnliche Drücke (~200-250mBar) entstehen können. Der Druck aus der Norm ist weiterhin ohne Probleme mit den Anlagen abzubilden.

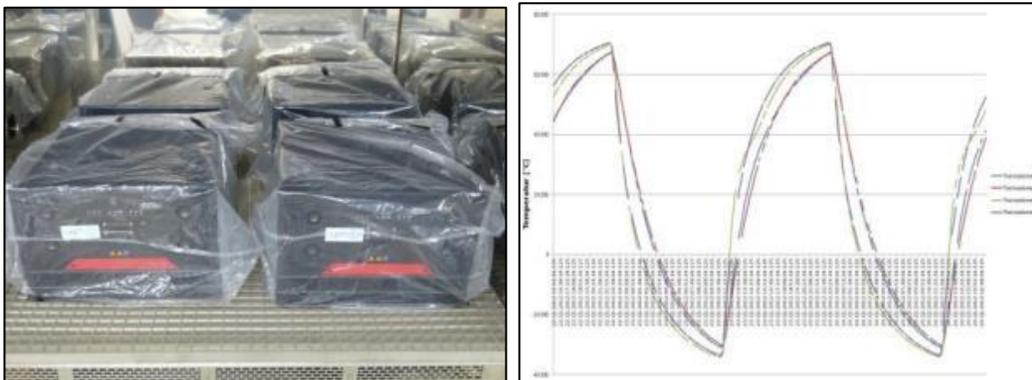
### 5.8.3 T2 Temperaturwechselprüfung

Beim Transport können sowohl extrem hohe als auch extrem niedrige Temperaturen auftreten. Als Beispiel ist hier der Transport im untemperierten Frachtraum eines Flugzeugs genannt bei dem sehr niedrige Temperaturen auftreten können. Auf der anderen Seite können hohe Temperaturen dagegen im stark sonnenbeschienenen Container eines Frachtschiffs in äquatornahen Regionen auftreten. Gegen diese Temperaturen muss die Batterie abgesichert werden. Tabelle 11 zeigt die Parameter der Prüfung und die dazugehörigen Bestehenskriterien.

<b>T2 Temperaturwechselprüfung</b>	
Anzahl Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 Stück</li> </ul>
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 Stunden Lagerung bei 72°C gefolgt von 12 Stunden Lagerung bei -40°C.</li> <li>• 10fache Wiederholung des Zyklus (gesamt 240h)</li> <li>• Untemperierung innerhalb von 30Minuten</li> </ul>
Bestehenskriterien:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Undichtigkeit, Kein Masseverlust, Kein Öffnen, Keine Risse, Keine Zerlegung, Kein Feuer</li> <li>• Leerlaufspannung &gt; 90%</li> </ul>

**Tabelle 11: Parameter und Bestehenskriterien der Temperaturwechselprüfung (T2)**

Abbildung 17 zeigt den Aufbau im Prüfraum sowie die Verteilung der Temperatur im Inneren der Batterie D beispielhaft für zwei Zyklen. Abbildung 18 zeigt den Prüfaufbau bei Batterie A Module 53 NMC 7s2p und stellt weiterhin beispielhaft den externen Temperaturwechsel des klimatisierten Raums dar.



**Abbildung 17: Temperaturwechselprüfung der Batterie D, links: Aufbau im klimatisierten Prüfraum, rechts: beispielhafte Temperaturverteilung innerhalb der Batterie**

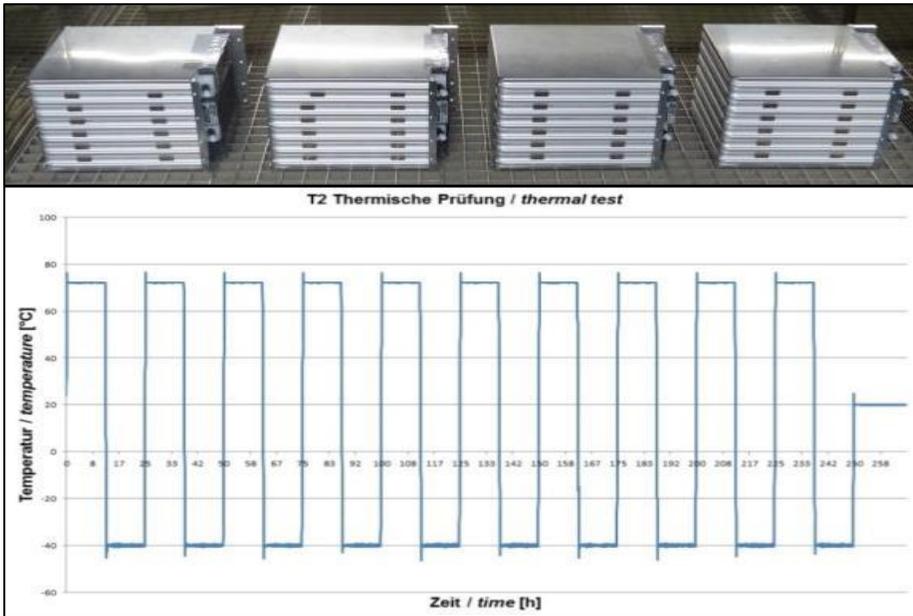


Abbildung 18: Temperaturwechselprüfung bei Batterie Batterie A, oben: Aufbau im klimatisierten Prüfraum, unten: beispielhafte Temperatur der Klimakammer (Ausfahrten der Temperaturgrenzen)

Die Vorgabe in der Norm wurde zwar von 75°C auf 72°C abgesenkt, dennoch bewerten wir diesen Test als kritisch vor allem wenn Module auf Basis von Pouch-Zellen zum Einsatz kommen. Bei den von uns eingesetzten Modulen, wurde eine signifikante Gasung der Pouch-Zellen beobachtet. Als Folge der aufgeblähten Zellen entstehen starke Verspannungen innerhalb des Systems, die zur starken Verformung des Gesamtmoduls führen.

#### 5.8.4 T3 Vibrationsprüfung

Vibrationsprüfungen werden durchgeführt um Belastungen während des Transports abzusichern, zum Beispiel bei einem Transport im LKW über eine schlecht befestigte Straße. Die Prüfungsparameter und Bestehenskriterien sind in Tabelle 12 dargestellt.

<b>T3 Vibrationsprüfung</b>	
Anzahl Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 Stück</li> </ul>
Umgebungstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raumtemperatur (20°C +/-5°C)</li> </ul>
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dauer: 3 Stunden Vibrationsprüfung je Raumachse</li> <li>• Sinusförmige Anregung im Bereich 7 Hz – 200 Hz</li> <li>• Beschleunigung im Bereich 1 g – 2 g.</li> </ul>
Kriterien:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Undichtigkeit, Kein Masseverlust,Kein Öffnen, Kein Riss, Keine Zerlegung, Kein Feuer</li> <li>• Leerlaufspannung &gt; 90%</li> </ul>

Tabelle 12: Parameter und Bestehenskriterien für die Vibrationsprüfung (T3)

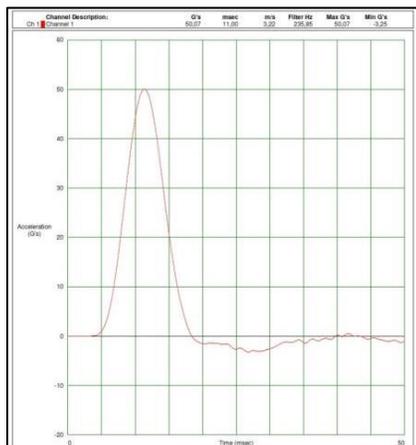
Die Anforderung aus der Norm mit einer Belastung von maximal 2g kann von dem Prüfsystem ohne Probleme abgebildet werden. Inwiefern diese Anforderungen mit realen Belastungen beim Transport übereinstimmen, kann von unserer Seite aufgrund fehlender Vergleichswerte nicht beantwortet werden.

### 5.8.5 T4 Schockprüfung

Schockprüfungen werden durchgeführt, um die Sicherheit bei plötzlichen und intensiven Belastungen während des Transports gewährleisten zu können. Als Beispiel sei hier das Fahren über einen Bordstein oder ein abruptes Absetzen der Batterie angeführt. Die Parameter und Bestehenskriterien sind in Tabelle 13 zusammengefasst

<b>T4 Schockprüfung</b>	
Anzahl Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 Stück</li> </ul>
Umgebungstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raumtemperatur (20°C +/-5°C)</li> </ul>
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 Schocks pro halber Raumachse</li> <li>• 18 Schocks gesamt (3x6 Richtungen: X+, X-,Y+,Y-,Z+,Z-)</li> <li>• Sinusförmige Anregung mit 50g Beschleunigung (max)</li> <li>• 11 ms Dauer</li> </ul>
Bestehenskriterien:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Undichtigkeit, Kein Masseverlust, Kein Öffnen, Kein Riss, Keine Zerlegung, Kein Feuer</li> <li>• Leerlaufspannung &gt; 90%</li> </ul>

**Tabelle 13: Parameter und Bestehenskriterien für die Schockprüfung (T4)**



**Abbildung 19: halbsinusförmige Schockbelastung**

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass wir den Test als sinnvoll ansehen und uns ähnliche Belastungen beim realen Transport vorstellen können. Die gemäß der Norm definierten Parameter können von den Prüfsystemen umgesetzt werden. Abbildung 19 stellt eine beispielhafte Belastung dar.

### 5.8.6 T5 Externe Kurzschlussprüfung

Eine externe Kurzschlussprüfung gehört ebenfalls zu den Tests im Kontext Transportsicherheit. Hiermit soll sichergestellt werden, dass die entsprechenden Sicherheitseinrichtungen der Batterie auch greifen wie z.B. Schmelzsicherung im Fehlerfall. Als Beispiel kann ein Modul genannt werden, bei dem es über die Metallbehälter zu einem Kurzschluss kommen kann. Für die Tests an den vier unterschiedlichen Batterien wird ein relativ hoher externer Widerstand von 75mΩ verwendet (vgl. AP10 und AP12).

Die Parameter und Kriterien für diesen Test können in Tabelle 14 nachgelesen werden.

<b>T5 Externe Kurzschlussprüfung</b>	
Anzahl Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 Stück</li> </ul>



Umgebungstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 55°C</li> </ul>
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externer Kurzschlusswiderstand &lt; 0,1 Ohm.</li> </ul>
Kriterien:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Riss</li> <li>• Keine Zerlegung</li> <li>• Kein Feuer</li> <li>• Äußere Temperatur &lt; 170°C</li> </ul>

**Tabelle 14: Parameter und Bestehenskriterien für externe Kurzschlussprüfung (T5)**

Grundsätzlich halten wir die Durchführung einer externen Kurzschlussbelastung für sehr wichtig und auch sinnvoll. Die Durchführbarkeit ist mit den Anlagen an Batterien oder Modulen mit Sicherheitseinrichtungen, Schalter oder Sicherungen ebenfalls kein Problem. Wir möchten allerdings einen Punkt herausstellen, in dem aus unserer Sicht noch Handlungsbedarf besteht: Gemäß der Norm soll der Kurzschluss mit einem Widerstand <0.1Ω durchgeführt werden. Wir halten es für sinnvoll diesen Wert näher zu konkretisieren, da Tests mit großem Widerstand in kleineren Strömen resultiert und folglich weniger kritische Situationen erreicht werden. Ein möglicher Vorschlag wäre hier beispielsweise den zu verwendenden Widerstand abhängig von Spannungsklassen auszuwählen.

Beispielhaft werden nun Ergebnisse von einzelnen Tests an verschiedenen Batterien vorgestellt und erläutert. Abbildung 20 zeigt das Verhalten einer Batterie D bei externem Kurzschluss in inaktivem Zustand (geöffnete Schütze). Es ist weder ein Spannungseinbruch noch ein signifikanter Stromfluss zu verzeichnen. Abbildung 21 zeigt das Temperaturverhalten vor und während des Tests. Zu Beginn ist eine Temperaturerhöhung von 20°C auf 55°C zu erkennen, welche auf die sehr ändernde Umgebungstemperatur zurückzuführen ist. Es ist allerdings keine Temperaturerhöhung über die Umgebungstemperatur von 55°C hinaus zu beobachten. Dieses Verhalten ist logisch, da bedingt durch die geöffneten Schütze keine Verbindung zwischen Kurzschlusswiderstand und Zellen besteht; dieser Fall ist folglich als unkritisch zu bewerten.



**Abbildung 20: externer Kurzschlussstest (T5) an inaktiver Batterie D bei 55°C und Widerstand von 75mΩ**

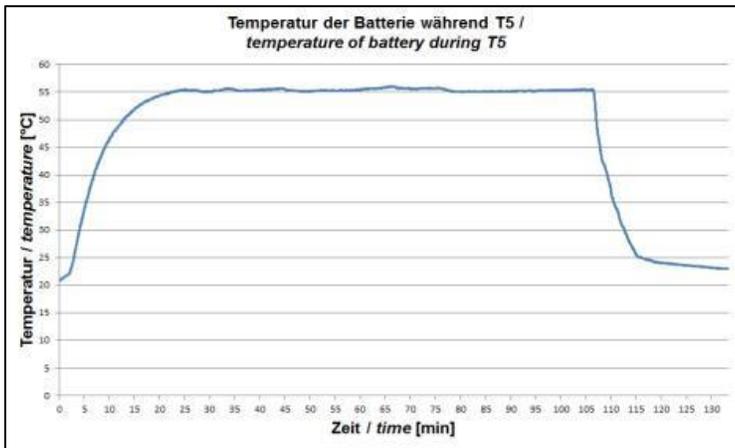


Abbildung 21: Aufheizverhalten und Temperaturverlauf im Rahmen des externen Kurzschlusses bei inaktiver Batterie D

An einer baugleichen Batterie wurde der identische Test in aktivem Zustand durchgeführt. Folglich sind in diesem Szenario die Schütze geschlossen und der externe Widerstand von  $75\text{m}\Omega$  wird auf die Zellen aufgeschaltet. Die resultierenden Spannungs- und Stromverläufe sind in Abbildung 22 dargestellt. Es lässt sich ein kurzer Stromimpuls von 135ms Zeitdauer und hohem Strom von  $700\text{A}$  nach Aufschaltung des Widerstands feststellen. Zeitgleich bricht die Batteriespannung um  $6\text{-}8\text{V}$  auf ca.  $52\text{V}$  ein. Nach Abschalten des Stroms nach einer Zeitdauer von  $t \approx 230\text{ms}$ , bricht die Spannung zeitnah auf  $0\text{V}$  ein. Dieses Verhalten ist auf das Auslösen der Schmelzsicherung zurückzuführen. Da die Sicherung sehr schnell auslöst, ist kein signifikanter Temperaturanstieg der Batterie zu verzeichnen. Folglich besteht diese Batterie den Test.

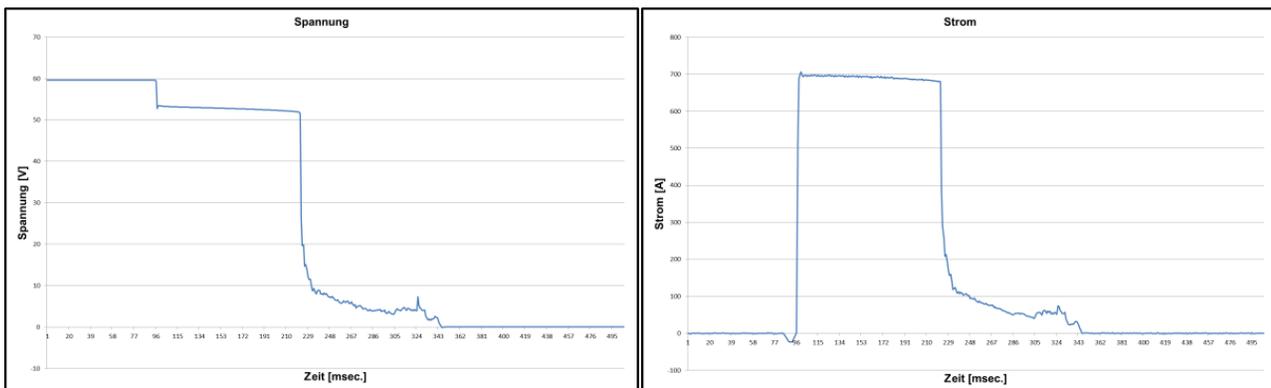


Abbildung 22: Spannungs- und Stromverlauf bei externem Kurzschluss bei Batterie D, aktive Batterie

Der folgende Kurzschluss test wird an einer Batterie C bei einer Umgebungstemperatur von  $55^\circ\text{C}$  durchgeführt. Zu Beginn des Tests liegt die volle Batteriespannung entsprechend  $100\%$  SOC an. Nach  $80\text{ms}$  wird der Kurzschluss auf die Batterie aufgeschaltet. Wie in Abbildung 21 zu sehen, erhöht sich der Strom in mehreren Stufen, bevor er nach einem Maximum von  $33\text{A}$  auf  $0\text{A}$  zurückfällt. Weiterhin ist zu nennen, dass die Zeit bis zum vollständigen Auslösen der Sicherung etwa  $140\text{ms}$  beträgt. Die Batterie und der resultierende Stromverlauf im beschriebenen Kurzschluss-Fall ist ebenfalls in Abbildung 21 zu sehen. Durch die kurze Pulsdauer und die moderate Stromerhöhung konnte auch in diesem Fall keine signifikante Temperaturerhöhung der Batterie beobachtet werden.

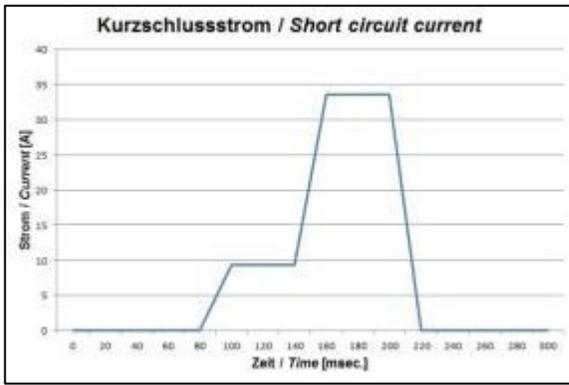


Abbildung 23: externer Kurzschlussstest bei Batterie C mit Sicherung

Als Kontrast zu den bis dato betrachteten Batterien mit Sicherung folgt nun die externe Kurzschlussprüfung an einem Batterie C-Modul ohne Sicherung. Der Test wird analog bei 55°C und mit einem Kurzschlusswiderstand von 75mΩ durchgeführt. Beim Aufschalten des Widerstands auf das ungesicherte Modul sind im ersten Augenblick Ströme im Bereich von 270A zu beobachten. In den folgenden 20min verbleibt der Strom über 200A, s. Abbildung 24, allerdings mit leicht abnehmender Tendenz (proportional zur Zellspannung, vgl. Abbildung 25). Im Anschluss brechen sowohl Spannung als auch Strom auf einen Wert nahe 0 ein, da zu diesem Zeitpunkt die Zellen scheinbar entladen sind. Zum Zeitpunkt des Einbruchs werden die höchsten Temperaturen verzeichnet, diese liegen je nach Sensorposition zw. 72/73°C und 83/84°C. Die hohen Temperaturen, resultieren aus dem vergleichsweise langen Stromfluss von >20 Minuten.

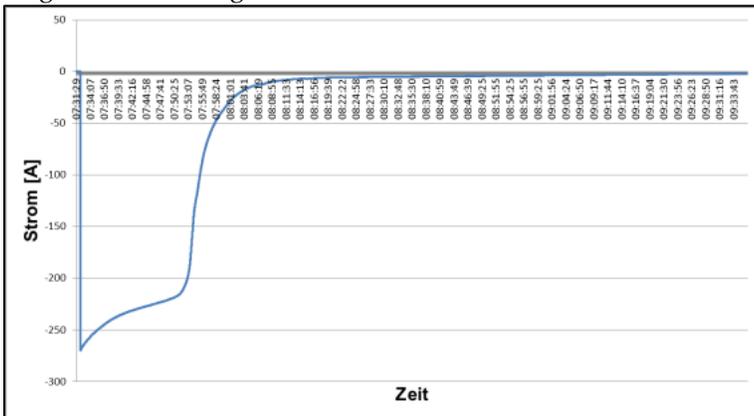


Abbildung 24: Stromverlauf beim Kurzschlussstest an einem Batt C-Modul ohne Sicherung (5mΩ, 55°C)

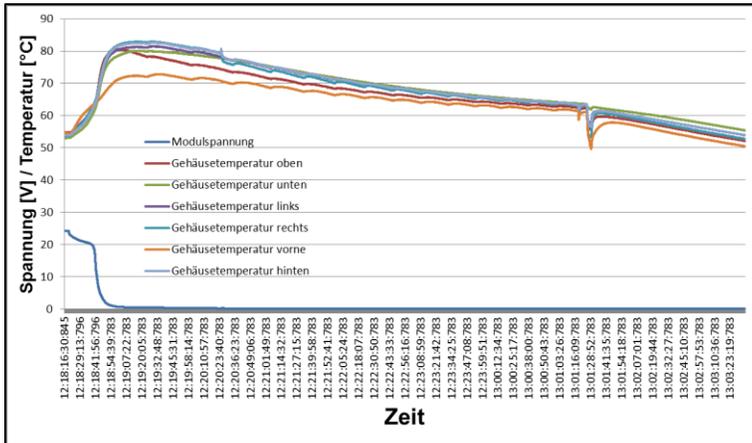


Abbildung 25: resultierende Zellspeisung und registrierte Temperaturen beim Kurzschluss an einem Batterie C-Modul ohne Sicherung (5mΩ, 55°C)

### 5.8.7 T7 Überladeprüfung

Eine Überladeprüfung soll die Sicherheitsfunktion hinsichtlich einer (ungewollten) Überladung sicherstellen, die z.B. durch Fehler in der Elektronik auftreten können. Insbesondere die mechanische Stabilität soll im Überladefall abgesichert werden. In Tabelle 15 sind sowohl die zu verwendeten Parameter als auch die Bestehenskriterien aufgeführt.

T7 Überladeprüfung	
Anzahl Prüfmuster	• 4 Stück
Umgebungstemperatur	• Raumtemperatur (20°C +/-5°C)
Parameter	• Überladung mit doppeltem Nennstrom (gemäß Hersteller) • 1,2 fachen Ladeschlussspannung, Dauer: 24h
Bestehenskriterien:	• Keine Zerlegung,Kein Feuer

Tabelle 15: Parameter und Bestehenskriterien für Überladeprüfung (T7)

In Abbildung 26 wird die Reaktion einer Überladprüfung an einer inaktiven Batterie D dargestellt. Es ist weder ein Spannungsanstieg noch ein Stromfluss zu erkennen, was mit den geöffneten Schützen der inaktiven Batterie zu erklären ist.

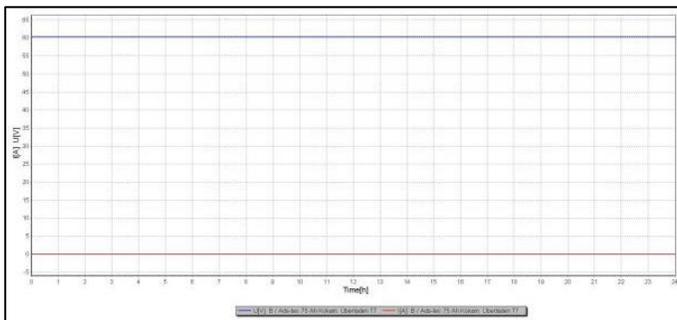


Abbildung 26: Überladeprüfung an inaktiver Batterie D



## 5.9 AP 1.12 Prüfung LIB stationär

In diesem Arbeitspaket wurde der Schwerpunkt auf die Prüfung von stationären Batteriekonzepten gelegt. Alle Batterien wurden einer Schutzartprüfung unterzogen, oder aber die entsprechenden Prüfungsergebnisse des Herstellers herangezogen, wenn diese vorlagen. Stationäre Batterien haben andere Voraussetzungen als mobile Geräte; bspw. kann man mit relativ homogenen klimatischen Bedingungen am Aufstellort rechnen. Weiterhin wird angenommen, dass der von außen induzierte Verschmutzungsgrad deutlich geringer ausfallen wird.

In diesen Szenarien wird im Wesentlichen der Aufstellort innerhalb des Hauses untersucht. Daher spielen Faktoren wie Gefährdung durch Wasser, wie z.B. bspw. Leckage von Wasserrohren, Verschmutzung z.B. Staub und Gefährdung durch Fremdkörper für die Sicherheitsbewertung der Batterie eine entscheidende Rolle. Auch die Isolationsprüfung, d.h. Abschätzung des Einfluss von verschlechternder Isolation ist sehr wichtig, da die Wahrscheinlichkeit für einen Kontakt mit dem Besitzer deutlich höher als bei mobilen Geräten angenommen wird. Zuletzt spielt die Bewertung der Brandschutzklassen für stationäre Batterien eine sehr wichtige Rolle. Hier sollten bspw. flammhemmende und selbstverlöschende Materialien verwendet werden um im Fehlerfall keine großen Schäden zu verursachen. Weiterhin muss ein Ausbreiten von Hitze und Flammherden unter allen Umständen vermieden oder minimiert werden, so dass nicht das gesamte Speichersystem abbrennt.

LIB stationär	Batterie D	Batterie C
1. Schutzartprüfung / Berührschutz/	✓	✓
2. Materialprüfung	✓	✓
3. Sicherheitsanforderungen	✓	✓
4. Isolationsprüfung	✓	✓
5. Externer Kurzschluss	✓	✓
6. Überladung	✓	Module ohne Überladeschutz, daher auf Systemebene durchgeführt.
7. Thermische Belastung	✓	✓

Tabelle 16: Übersicht über die Prüfungen bei den zu testenden Batterien (stationär)

### 5.9.1 Schutzartprüfung / Berührschutz

Tabelle 17 zeigt die beim Hersteller durchgeführten Schutzartprüfungen auf. Weiterhin sind die wichtigen Ergebnisse (bspw. IP-Schutzklassen) aufgeführt.

Batterie	Schutzart
Batterie C	mindestens IP50: geschützt gegen Staub in schädigender Menge, vollständiger Schutz gegen Berührung, kein Schutz gegen Wasser
Batterie D	IP20:geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 12,5 mm,geschützt gegen den Zugang mit einem Finger, kein Schutz gegen Wasser

Tabelle 17: Details der Schutzartprüfung (laut Hersteller)

### 5.9.2 Materialprüfung

Batterie	Material
----------	----------



Batterie C	Metallgehäuse, Kunststoffe der Klassen V0 oder V1
Batterie D	Metallgehäuse, Kunststoffe der Klassen V0 oder V1

Tabelle 18: Auflistung der verwendeten Materialien

### 5.9.3 Sicherheitsanforderungen

Im Folgenden siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden die verbauten Sicherheitskomponenten und Schutzeinrichtungen der verwendeten Batterien gegenüber bestimmten Fehlerfällen gegenübergestellt. Die Überprüfung der Wirksamkeit im Kontext der durchzuführenden Sicherheitsprüfungen soll mit den Prüfungen aus AP 10,11 und 12 nachgewiesen werden. Bei der Batterie D wurde zusätzlich ein Review der Risikoanalyse durchgeführt, um diese auf Richtigkeit und Vollständigkeit zu prüfen.

		Batterie D	Batterie C
Schutz gegen	Überladung	X	X
	Überspannung	X	X
	Tiefentladung	X	X
	Übertemperatur	X	X
	Untertemperatur	X	X
	Überlast	X	X
	Kurzschluss	X	X
Schutzeinrichtungen	Schütze	X	X
	Halbleiterschalter		
	Schmelzsicherung	X*	X**
	BMS	X	X
	Temperaturüberwachung	X	X
	Strom/Leistungsüberwachung	X	X
	Zell/Batteriespannungsüberwachung	X	X
Risikoanalyse (VDE-Prüfung)	positiv		
*: entnommen zum Transport, **: zum Transport auf Modulebene, sonst im System			

Tabelle 19: Vergleich der Sicherheitskomponenten und Schutzvorkehrung der zu testenden Batterien (stationär)

### 5.9.4 Isolationsprüfung

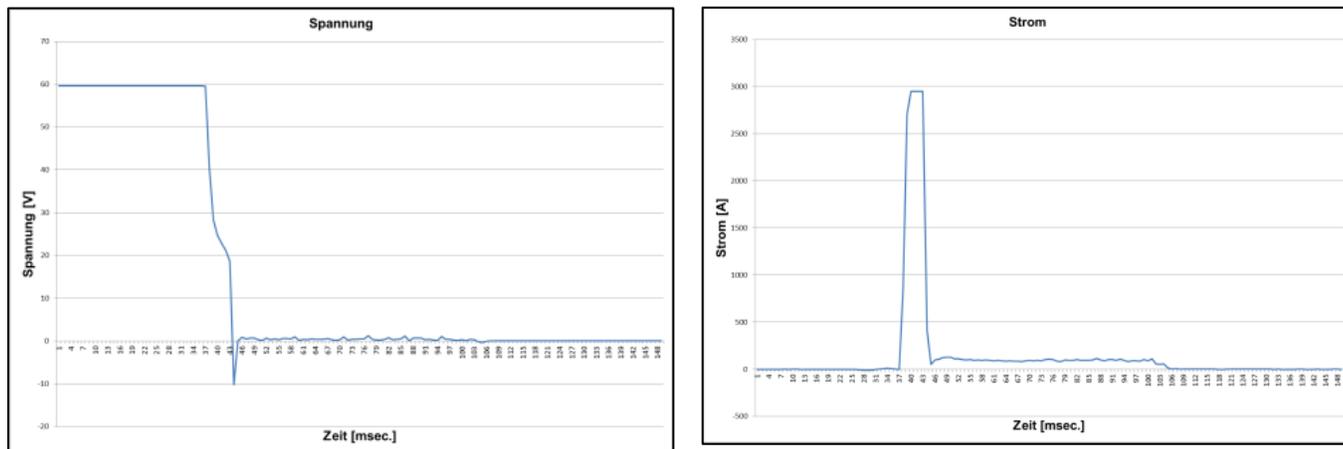
Eine Isolationsprüfung d.h. Test ob gefährdende Spannungen an berührbaren Teilen des Gehäuses anliegen wird sowohl vor als auch nach den entsprechenden (mechanischen) Prüfungen durchgeführt. Ein positives Ergebnis (+) zeigt an, dass sowohl vor, als auch nach dem Test keine gefährdende Spannung detektiert werden konnte. Die folgende Tabelle 20 zeigt einen Überblick über die erzielten Ergebnisse auf:

	Test	Batterie C	Batterie D
Isolationsprüfung (vor und nach Test)	T1 Vakuumprüfung	+	+
	T2 Temperaturwechselprüfung	+	+
	T3 Vibration	+	+
	T4 Schock	+	+
	T5 Externer Kurzschluss	+	+
	T7 Überladung		+
	Externer Kurzschluss (SLIB stationär)	+	+
	Thermische Belastung	+	+
	Überladeprüfung	+	+

Tabelle 20: Isolationsprüfung (stationäre Batterien) vor und nach entsprechenden Tests (+ = positiv)

### 5.9.5 Externe Kurzschlussprüfung

Zunächst wurde ein externer Kurzschluss an der Batterie D durchgeführt. Dieser Test wurde weiterhin in zwei Varianten bei einer inaktiven und einer aktiven Batterie durchgeführt. Beide Tests wurden mit einem sehr niederohmigen externen Kurzschlusswiderstand von  $5\text{m}\Omega$  und einer Umgebungstemperatur von  $55^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  durchgeführt. Beispielpflicht wird hier das Kurzschlussverhalten an einer aktiven Batterie D beschrieben. Vor dem Kurzschluss ist eine Spannung von ca.  $60\text{V}$  zu beobachten, was dem definierten Ladezustand von  $100\%$  SOC entspricht. Der Kurzschluss wird hier bei einem Zeitpunkt von  $37\text{ms}$  auf die Batterie aufgeschaltet – dies kann aus dem starken Spannungseinbruch vgl. Abbildung 27 gefolgert werden. Für eine Dauer von  $\sim 10\text{ms}$  ist ein sehr hoher Stromfluss im Bereich von  $3000\text{A}$  zu beobachten. Anschließend sinkt sowohl der Strom als auch die Spannung auf einen Wert von  $0$ , was dem Auslösen der Schmelzsicherung geschuldet ist.

Abbildung 27: Spannungs- und Stromverlauf externer Kurzschluss ( $5\text{m}\Omega$ ) Batt D (Batterie aktiv)

Die Anforderung aus der Norm (Externer Kurzschlusswiderstand  $5\text{m}\Omega$ ) ist von Batterien bzw. Modulen mit Sicherheitseinrichtungen (Schalteinrichtungen oder Sicherungen) auf dieser Ebene erfüllbar. Vergleiche hierzu UN38.3 Transporttest: Externer Kurzschlusswiderstand  $< 0,1\text{ Ohm}$ .

### 5.9.6 Überladung

Eine Überladeprüfung soll die Sicherheitsfunktion hinsichtlich einer ungewollten Überladung z.B. durch Fehler in der Elektronik sicherstellen. Insbesondere soll die mechanische Stabilität im Überladefall abgesichert werden.



Die Überladeprüfung wurde an beiden Systemen durchgeführt. Die Umgebungsparameter wurden jeweils auf  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  gewählt. Weiterhin soll die zweifache Ladeschlussspannung mit doppeltem Nennstrom erreicht werden. Die Ergebnisse fallen sehr homogen aus; Abbildung 28 zeigt den Verlauf von Strom und Spannung beim Batterie C-System. Auffallend ist, dass keine Überladung stattfindet, da die Spannung bei der Anfangsspannung verbleibt und weiterhin kein Stromfluss zu beobachten ist. Das identische Verhalten zeigt auch Abbildung 35. Folglich scheinen für beide Systeme die Schutzeinrichtungen gegenüber Überladen einwandfrei zu funktionieren. Finale Anmerkung zur Prüfung des Batterie C-Systems: Hier wurde das Gesamtsystem (mit Sicherheitseinrichtung getestet. Die Einzelmodule für sich genommen haben keine Sicherheitseinrichtungen.

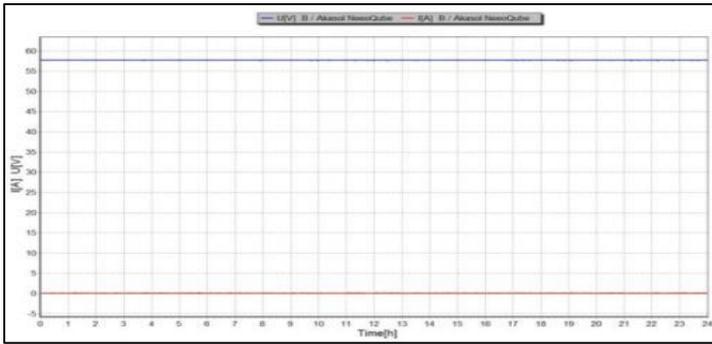


Abbildung 28: Überladeversuch an Batterie C

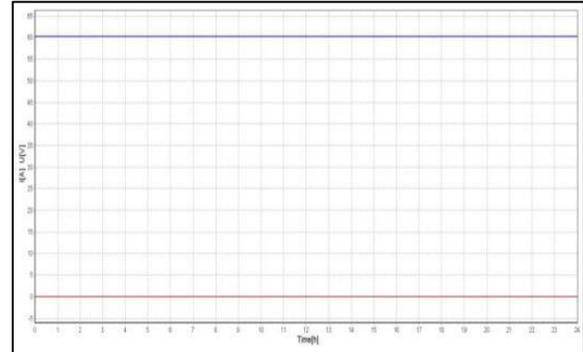


Abbildung 29: Überladeversuch an Batterie D

Die Anforderung aus der Norm (Überladung bis zur 2-fachen Ladeschlussspannung oder 2 C) ist von Batterien bzw. Modulen mit Sicherheitseinrichtungen auf dieser Ebene erfüllbar. Generell sollten die Überladeprüfungen unterteilt werden in Überladung mit Überstrom und Überladung mit Überspannung (siehe IEC 62619).

### 5.9.7 Thermischer Belastungstest

Um die Robustheit der Batterien gegenüber Übertemperaturen abprüfen zu können wurde ein thermischer Belastungstest durchgeführt. Dazu wurde der Prüfraum auf  $130^{\circ}\text{C}$  erhitzt und diese Temperatur anschließend für ca. 30min gehalten. Die zugehörige Norm ist IEC62660-2. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass beide Batterien diesen Test ohne Probleme bestehen. Weiterhin können bei beiden Batterien relativ homogene Maximaltemperaturen von knapp über  $100^{\circ}\text{C}$  beobachtet werden, vgl. Abbildung 30 (Batterie D) und Abbildung 31 (Batterie C). Weiterhin kann für beide Batterien festgehalten werden, dass weder ein Spannungseinbruch zu verzeichnen ist, noch irgendwelche äußeren Veränderungen an den Batterien beobachtet werden konnten.

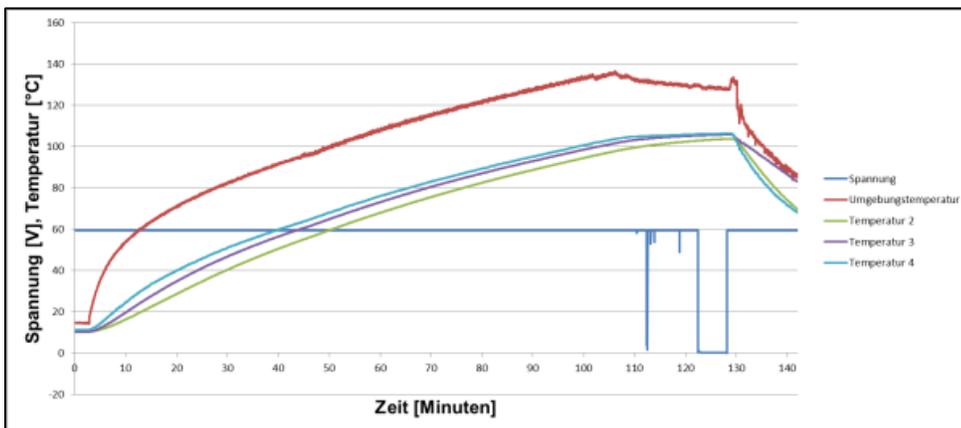


Abbildung 30: thermische Überlastungsprüfung an Batterie D

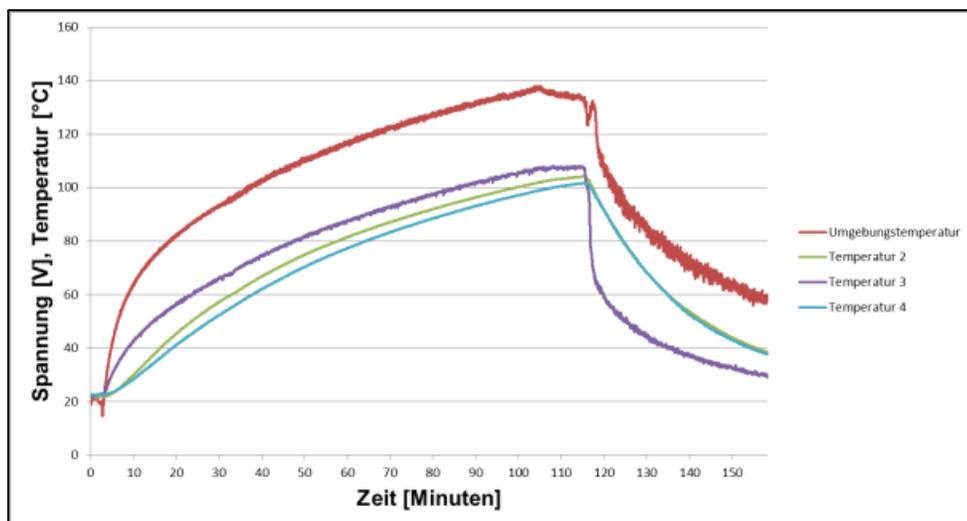


Abbildung 31: thermische Überlastungsprüfung an Batterie A

Die Anforderung aus der Norm, Erwärmung bis 130°C wurde von den von uns geprüften Batterien erfüllt. Es ist fraglich, ob diese Anforderung an stationär eingesetzte Batterien gestellt werden muss. Diese Anforderung macht aus unserer Sicht Sinn für Batterien, welche im Motorraum eines Verbrennungsmotors eingesetzt werden.

## 5.10 AP 1.13 Beschaffung der erforderlichen Batterien für die Prüfungen

Die Beschaffung der zur Durchführung der definierten Prüfungen benötigten Batterien erwies sich als äußerst schwierig, zeitaufwendig und arbeitsintensiv. Viele Hersteller scheuten die relativ hohen Kosten bedingt durch Material und Fertigung, die ihnen durch die Bereitstellung der zum Teil großen und komplex aufgebauten Batterien entstehen. Andere Hersteller sehen die Veröffentlichung der Prüfergebnisse im Rahmen des Forschungsprojekts als kritisch an, so dass sie sich nicht am SLIB-Projekt beteiligen wollten. Es war viel Überzeugungsarbeit nötig, um überhaupt ausreichend Batterien zur Verfügung gestellt zu bekommen.

# 6 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

## 6.1 Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Prüfung von Einzelzellen ist eine unabdingbare Voraussetzung um das Risiko bei daraus zusammengesetzten Modulen und Batterien bei der Prüfung zu minimieren. Die hohe Individualität und Komplexität der Prüfungen erfordert erstklassig qualifizierte Fachkräfte und eine ausgefeilte, an die bestehenden Risiken angepasste, moderne Prüftechnik. Mit Zunahme der individuell entwickelten Batterien für die unterschiedlichen Fahrzeughersteller, geht zwangsläufig eine steigende Anzahl an Prüfungen einher, welche dazu führen wird, dass weitere Prüfkapazitäten geschaffen werden müssen. Dies geht natürlich auch mit der Schaffung von zusätzlichen Arbeitsplätzen einher. Für die nächsten Jahre ist in dem neu aufzubauenden VDE Testlab in Offenbach im Goethering eine Erweiterung der Prüfkapazitäten durch zusätzliche Klimaschränke und weitere Zyklierer vorgesehen. Diese Kapazitätserweiterung führt zwangsläufig dazu, dass auch mehr Personal eingestellt werden muss um entsprechende Prüfungen vorzunehmen. Die derzeitige Planung geht von einer



Aufstockung des Personals um 4 Mitarbeiter bis zum Jahr 2015 aus. Nach Ende des Forschungsprojektes stehen die Prüfeinrichtungen für die Prüfung von Batterien aller interessierten Firmen zur Verfügung und werden entsprechend den beim VDE üblichen Methoden vermarktet. Ein Ansatz des Projektes ist es durch die Einbringung der Erkenntnisse in die internationale Normung zumindest die Kosten, die z. Zt. noch aufgrund von international unterschiedlichen Anforderungen resultieren, zu minimieren und in Deutschland ansässigen Unternehmen der Batterieindustrie den Weltmarkt eröffnen. Ein anderer Ansatz zielt in die Richtung den Nachweis zu erbringen, dass Prüfungen, welche für den Nachweis der Sicherheit der Technologie für den gedachten Einsatzzweck notwendig sind, als ausreichend zur Erfüllung von gesetzlich geforderten Prüfungen (UN Transportbestimmungen) darzustellen und diese Erkenntnisse in die zuständigen Gremien einzubringen.

## 6.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Sichere LIBs sind ein Hauptinteresse der Forschung und Entwicklung weltweit. Durch dieses Projekt ist gewährleistet, dass die heutigen Vorarbeiten, die durch die beteiligten Partner im Rahmen der Vornorm DIN V VDE V 0510-11 erreicht wurden, dazu führen, die Technologieführerschaft hinsichtlich Sicherheit und Qualität auszubauen. Außerdem werden die aus den Untersuchungen und Prüfungen gewonnenen Ergebnisse die Umsetzung der nationalen Vornormen in internationale Normen (IEC) und Europäische Normen (EN) untermauern. Es ist zu erwarten, dass die beteiligten Unternehmen – auch durch die Möglichkeit der Prüfung und Zertifizierung ihrer LIBs – Marktvorteile nutzen und ausbauen können. Durch die Erarbeitung von Sicherheitsanforderungen für den Transport sowie für den Einsatz von LIBs in stationären Anwendungen werden neue Sicherheitskonzepte erwartet, die in internationale Standards einfließen. Die Hersteller von Li-/Li-Ion Zellen und Batterien und –Systemen sind z. Zt. mehrheitlich mittelständische Unternehmen. Diese haben ein großes Interesse daran, die Risiken der Produkthaftung bei der Markteinführung der neuen Technologie zu reduzieren. Daher bestehen grundsätzlich gute Aussichten, schon in einer relativ frühen Phase Prüfleistungen für einzelne Zellen und Batteriemodule erfolgreich zu vermarkten.

Natürlich spielt auch die Größe der Batterie eine Rolle, da einzelne Prüfungen auf teuren Prüfanlagen durchzuführen sind, deren Kapazität in Bezug auf das Gewicht begrenzt ist, so dass je nach Größe der Batterie mehrere Prüfungen gefahren werden müssen anstatt das gesamte Prüflös mit einer Prüfung abdecken zu können.

Nach Fertigstellung des VDE Testlabs im Jahr 2014 steht heute ein moderner Prüfbereich mit entsprechenden Einrichtungen zur Verfügung. Die bereits zur Verfügung stehenden Normen können somit alle abgeprüft werden. Aufgrund des neuen Testlabs sind wir in der Lage, auch zukünftige Anforderungen an Speicher oder Änderungen Richtung Sicherheitsanforderungen umzusetzen und dem Markt zur Verfügung zu stellen.

## 7 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es ist kein während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen bekannt.

## 8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

In denen vom VDE-PI durchgeführten Arbeitspaketen wurden keine Veröffentlichungen bekannt gegeben.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts SLiB - Sicherheit von Li-Ionen Batterien	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Kluth, Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2014
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum geplant
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut Merianstr.28 63069 Offenbach	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03X4605B
	11a. Seitenzahl Bericht 32
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben
	14. Tabellen 20
	15. Abbildungen 53
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF),53170 Bonn	
18. Kurzfassung  Ziel des Projekts SLiB ist die Prüfung und Untersuchung der Sicherheitskonzepte heutiger und zukünftiger Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) und der Aufbau von Prüfkompetenz zur Durchführung von Sicherheitsprüfungen an LIBs. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen zurück in die Batterieentwicklung sowohl beim Hersteller als auch bei der Normungsarbeit. Damit wird in Zukunft ein hohes Maß an Sicherheit durch unabhängige Prüfung und Zertifizierung ermöglicht. Diese Zielstellung wurde durch die beiden Projektpartner VDE Offenbach und der Batterieabteilung des ZSW bearbeitet.  Durch Vorgabe der Prüf- und Zertifizierungsmodalitäten seitens der deutschen Batterieindustrie und der führenden deutschen Testhäuser besteht die Chance, diese Ergebnisse weltweit zu einem Standard zu machen und einen Entwicklungsvorsprung im Bereich großer Lithium-Batterie-Systeme, die einen immer höheren Stellenwert einnehmen, zu erzielen.	
19. Schlagwörter Sicherheit von Li-Ionen Batterien	
20. Verlag	21. Preis

\*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.