

Studie zur Bewertung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien über den gesamten Lebenszyklus

– Abschlussbericht –

Stand: 10.05.2017

Finanziert durch BMVI/PTJ
Koordiniert durch NOW
Projektleitung ZSW Ulm
Förderkennzeichen: 03EM0004
Kassenzeichen: 810303036379

Autoren:

Dr. Alexander Kabza / Dr. Meike Fleischhammer – ZSW Ulm
Dr. Klaus Brandt – Berater der Johnson Matthey Battery Materials GmbH
Manfred Herrmann / Horst Mettlach – Adam Opel AG
Georg Grothues – EA RNW
Prof. Dr. Jens Tübke / Matthias Krampfert – Fraunhofer ICT
Andreas Wagner – ZSW GmbH
Prof. Dr. Jürgen Garcke – FCBAT
Andreas Sauer – Fraunhofer ISI
Silke Wilhelm – NOW GmbH

Erstellt von: akabza	Erstellt am:	19.12.2016
Zuletzt geändert von: Alexander Kabza	Zuletzt geändert am:	10.05.2017
Verantwortlich: Dr. Alexander Kabza	Gedruckt am:	10.05.2017

1 Vorwort

1.1 ELEKTROMOBILITÄT UND DIE ZIELE DER BUNDESREGIERUNG

Klimaschutz und Energiewende in Deutschland zählen mit zu den wichtigsten gesamtpolitischen Aufgaben der kommenden Jahrzehnte. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 bis zum Jahr 2020 um 40 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 Prozent zu senken. Zu diesem Ziel muss auch der Verkehrssektor einen Beitrag leisten. Auf den Verkehr entfallen etwa 20 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland, davon wiederum etwa 57 Prozent auf das Segment des motorisierten Individualverkehrs (Bezugsjahr 2010).

Elektrische Antriebe haben gegenüber konventionellen Antrieben deutliche Effizienzvorteile und können durch den Einsatz von Energie aus erneuerbaren Quellen einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor – insbesondere im motorisierten Individualverkehr – leisten. Die Förderung der Elektromobilität ist daher ein zentraler Bestandteil von Anstrengungen der Bundesregierung in Richtung einer nachhaltigen Energie- und Verkehrspolitik.

Vor diesem Hintergrund fördert das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die batterieelektrische Mobilität seit 2009 im Rahmen der „Modellregionen Elektromobilität“ und seit 2012 innerhalb des ressortübergreifenden Bundesprogramms „Schaufenster Elektromobilität“. Darüber hinaus besteht das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“ seit 2007. Das BMVI unterstützt mit diesen Maßnahmen einen technologieoffenen Ansatz (Batterie, Hybridtechnologie und Brennstoffzelle) in den Segmenten Straße, Schiene, Luftverkehr und Schifffahrt. Im Fokus der Förderung stehen Demonstrationsvorhaben zum Nachweis der technischen Realisierbarkeit und Praxistauglichkeit sowie regionale Modell- und Technologieprojekte.

1.2 MODELLREGIONEN ELEKTROMOBILITÄT – WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITFORSCHUNG

In den Modellregionen des BMVI werden seit 2009 deutschlandweit in mehreren Städten und Regionen Flotten und Ladeinfrastrukturen aufgebaut, Geschäftsmodelle entwickelt und Akteure vor Ort für die erfolgreiche Entwicklung der Elektromobilität miteinander vernetzt. Zudem kooperieren die Projektpartner bei den inhaltlichen Fragestellungen und werten die erhobenen Daten und Projektergebnisse im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung aus. In den sieben „Themenfeldern“ stehen insbesondere folgende Fragen im Mittelpunkt:

- Wie kann ein bedarfsgerechter Aufbau von Ladeinfrastruktur erfolgen?
- Wie verändert Elektromobilität die Praxis der Stadt- und Verkehrsplanung?
- Welche Praxiserfahrungen haben bisherige private und gewerbliche Nutzer gemacht?

- Wie kann ein Einsatz von Elektrofahrzeugen in kommunalen und gewerblichen Flotten, im Wirtschaftsverkehr und im ÖPNV erfolgen?
- Welche ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen sind erforderlich?

Neben der Beantwortung dieser wesentlichen Fragen ist die Sicherheit von Batterien in Elektrofahrzeugen (EV) eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg der Elektromobilität. Daher spielt das Thema Sicherheit eine wichtige Rolle als Rahmen der Begleitforschung.

Ziel der wissenschaftlichen Begleitforschung ist es vor allem, Empfehlungen aus den Erfahrungen der Modellregionen abzuleiten und konkrete Handlungsleitfäden zu erstellen, die einem größeren Kreis von Akteuren zur Verfügung gestellt werden, um so den Markthochlauf der Elektromobilität in Deutschland zu unterstützen.

Der Kernpunkt der Erarbeitung dieser Studie liegt ca. 2 Jahre zurück, zwischenzeitlich sind Technik, Forschung und Erfahrung deutlich vorangeschritten. Während der Bearbeitung der Studie wurden diese Neuerungen so gut als möglich berücksichtigt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass alle Neuerungen in diese Studie eingeflossen sind. Der Bericht beinhaltet eine umfangreiche Sammlung von Informationen, erfahrene Nutzer können diese Informationen verifizieren und strukturieren. Mit dem Bericht wurde eine ausführliche Basis zum Thema Batteriesicherheit geschaffen, die jetzt entsprechend aktueller Entwicklungen weiterverfolgt werden muss. Aus „freier“ Verknüpfung isolierter Informationen z.B. zu gefährdenden Maßnahmen abzuleiten, ist nicht zulässig.

2 Verzeichnisse

2.1 Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	2
1.1	ELEKTROMOBILITÄT UND DIE ZIELE DER BUNDESREGIERUNG	2
1.2	MODELLREGIONEN ELEKTROMOBILITÄT – WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITFORSCHUNG 2	
2	Verzeichnisse	4
2.1	Inhaltsverzeichnis	4
2.2	Abbildungsverzeichnis	7
2.3	Tabellenverzeichnis	7
3	Einleitung und Zielsetzung	8
4	Hintergrund	10
5	Methodik der Sicherheitsbetrachtung	11
5.1	INERIS-Studie	11
5.2	Bewertungsgrundlage	12
5.3	Arbeitspakete	13
5.4	Bewertungsmatrix	14
5.5	Definition der Einzelkriterien	14
5.5.1	Schweregrad S	14
5.5.2	Eintrittswahrscheinlichkeit P	15
5.5.3	Kontrollierbarkeit C	15
5.6	Bewertungskennzahl BKZ	16
5.7	Zusammenarbeit mit Gremien	16
6	Sicherheitsbetrachtung über den Lebenszyklus der Batterie	18
6.1	Material und Zelle	18
6.1.1	Bewertungsmethodik	18
6.1.2	Ergebnisse	20
6.1.3	Zusammenfassung	22
6.2	Batterie und Batterie in EV	22
6.2.1	Bewertungsmethodik	22
6.2.2	Ergebnisse	23
6.2.3	Zusammenfassung	25
6.3	Transport und Lagerung	26
6.3.1	Transport	26

6.3.1.1	– Einführung	26
6.3.1.2	Kennzeichnung von Lithium-Ionen-Batterien	28
6.3.1.3	Risikobetrachtung für den Transport (zum Teil auch auf Lagerung übertragbar)	29
6.3.2	Lagerung	31
6.3.2.1	– Einführung	31
6.3.2.2	Risikobetrachtungen für die Lagerung	31
6.4	Nutzung.....	34
6.4.1	Vorgehensweise	34
6.4.2	Ergebnisse	36
6.5	Verwertung.....	40
6.5.1	Einführung.....	40
6.5.2	Ergebnisse	41
6.5.3	Zusammenfassung.....	42
6.6	Schadensbekämpfung	42
6.6.1	Ausbreitung eines Brandes und Brandrauch	43
6.6.2	Atemgifte.....	43
6.6.3	Freisetzung von Gasen bzw. Bewertung der Toxizität.....	43
6.6.4	Chemische Gefahren	44
6.6.5	Löschmittel	44
6.6.6	Gefährdung durch Elektrizität.....	44
6.6.7	Explosion	44
6.6.8	Fahrzeuge in einem geschlossenen Raum	45
6.6.9	Behandlung der Batterie nach einem Unfall.....	45
6.6.10	Rettungsleitfäden für Elektrofahrzeuge bzw. Rettungsdatenblatt.....	45
6.6.11	Schulung der Rettungskräfte.....	46
6.6.12	Zusammenfassung.....	46
6.7	Dokumentation.....	46
6.8	Internationale Zusammenarbeit.....	48
6.8.1	Hintergrund und allgemeine Aufgabenstellung.....	48
6.8.2	Allgemeiner Informationsaustausch	49
6.8.3	Detaillierter Informationsaustausch zu inhaltlichen Fragen.....	50
6.8.4	Weitere Arbeiten.....	51
6.8.5	Zusammenfassung.....	52
6.9	Zusammenfassung der Sicherheitsbetrachtung.....	52
7	Handlungsempfehlungen	55

7.1	Handlungsempfehlungen „Material und Zelle“	55
7.1.1	Materialauswahl.....	55
7.1.2	Sicherheit über der gesamten Zyklen/Kalender-Lebensdauer Fehler! Textmarke nicht definiert.	
7.1.2.1	Zusammenhängende Alterung-Sicherheit.....	55
7.1.3	Qualitätssicherung in der Zellfertigung.....	56
7.1.3.1	Qualitätssicherung - Standards	56
7.1.3.2	Qualitätssicherung - Messmethoden	56
7.1.4	Bewertung der Folgen interner Kurzschlüsse (bereits in Klärung)	57
7.1.5	Früherkennung eines internen Kurzschlusses einer Zelle innerhalb einer Batterie	57
7.2	Handlungsempfehlungen „Batterie und Batterie im EV“	57
7.2.1	Fahrzeugbrand durch externe Zündquellen sowie Thermal Propagation	58
7.2.2	Batteriemodifikationen	58
7.3	Handlungsempfehlungen aus „Lagerung und Transport“	59
7.3.1	Transport, insbesondere Lufttransport von Lithium-Ionen Batterien	59
7.3.2	Transport von beschädigte und/oder defekten Batterien.....	60
7.4	Handlungsempfehlungen „Nutzung“	61
7.4.1	Schnelle Identifizierung von Elektrofahrzeugen durch Rettungskräfte nach Unfall	61
7.4.2	Technische Überwachung: technische Hauptuntersuchung (§29 StVZO)	61
7.4.3	Einfluss von Langzeiteinlagerung auf das Sicherheitsverhalten von Batterien (Oldtimerthematik)	62
7.5	Handlungsempfehlungen „Verwertung“	62
7.5.1	Second Use durch die OEMs bzw. in Zusammenarbeit mit den OEMs.....	62
7.5.2	Second Use durch Dritte	63
7.5.3	Recycling.....	63
7.6	Handlungsempfehlungen „Schadensbekämpfung“	63
7.6.1	Schnelle Identifizierung des Batteriezustands nach einem Unfall.....	63
7.6.2	Maßnahmen zur Brandbekämpfung	64
7.6.3	Schulung / Training.....	64
7.6.4	Gasemissionen und Brandverhalten	65
7.6.5	Datenbank zum Monitoring von Schadenfällen.....	66
7.7	Handlungsempfehlungen aus AP Internationale Beziehungen.....	66
7.8	Weiteres Vorgehen.....	67
8	Zusammenfassung.....	68

9	Anhang	70
9.1	Abkürzungsverzeichnis	70
9.2	Literaturverzeichnis	72
9.3	Bewertungsmatrix	74
9.4	Liste relevanter Dokumente	77

2.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Sicherheitsbetrachtung über die gesamte Lebensphase der Batterie (entnommen aus (INERIS, 2011))	11
Abbildung 2:	Risikobewertung der INERIS-Studie (Stand 2013), Ziffern beziehen sich auf betrachtete Einzelrisiken.....	12
Abbildung 3:	Aufteilung in der INERIS-Studie auf die die einzelnen Lebensphasen	12
Abbildung 4:	Sicherheitsrelevante Einflüsse auf ein Batteriesystem	23
Abbildung 5:	Schalen-Sicherheitskonzept fahrzeugintegrierter Batteriesysteme (Galen Ressler, 2014).....	25
Abbildung 6:	Transportwege und verantwortliche Organisationen (Dittrich, 2015)	27
Abbildung 7:	Neues Kennzeichen für Lithium-Ionen-Batterien	29
Abbildung 8:	Neuer Gefahrzettel Nr. 9a	29
Abbildung 9:	Kühlkapazität vs. Wassertropfendurchmesser	33
Abbildung 10:	Fahrzeugkennzeichen für Elektrofahrzeuge (Quelle: BMVI)	36
Abbildung 11:	Plakette zur Kennzeichnung von Elektrofahrzeugen mit ausländischer Zulassung	36
Abbildung 12:	Datenbankmaske	48
Abbildung 13:	Bewertungskennzahl der betrachteten Einzelrisiken	52

2.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele für Zelltypen, die in BEV verwendet werden	19
Tabelle 2:	Definition der EUCAR Hazard Level	20

3 Einleitung und Zielsetzung

Die Sicherheit von Batterien in Elektrofahrzeugen (EV) ist eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg der Elektromobilität. Hierbei ist es unbedingt erforderlich, alle Lebenszyklen der Batterie gesamtheitlich zu betrachten, d.h. von der Zelle und ihren sicherheitsrelevanten Materialien über Batterien und deren Einbau ins Fahrzeug bis hin zur Nutzung und Verwertung. Auch Themen wie Lagerung, Transport, Service und Schadensbekämpfung müssen mit einbezogen werden. In vielen Bereichen gibt es bereits umfassende Maßnahmen zur Absicherung eines zuverlässigen und sicheren Betriebs von Batterien, so auch in der Automobilindustrie. Innovative Wertschöpfungsketten und Spezifika im Lebenszyklus von Batterien sind international in ausgewählten Fragestellungen ein Diskussionspunkt.

In 2011 erstellte INERIS in Frankreich eine Studie zum Thema Batteriesicherheit (INERIS, 2011). Die Ergebnisse dieser Studie wurden erst von der französischen Presse aufgegriffen und mit verkürzter und teilweise verfälschter Aussage wiedergegeben. Zum Beispiel stand in (Jean-Michel, 2011): „Elektrofahrzeuge sind nicht ohne Gefahr, da deren Lithium-Batterien Mängel aufweisen. Obwohl große Fortschritte im Bereich Batteriesicherheit gemacht wurden, ist eine inhärent sichere Technik in den kommenden Jahren nicht zu erwarten.“ In der deutschen Presse wurde daraufhin am 4.07.2011 geschrieben: „Frankreich warnt vor Elektroautos“ (Weber-Lamberdière, 2011) und „empfiehlt (...) Parkhaus-Betreibern einen Mindestabstand von 15 Metern zwischen Aufladebuchsen.“. Die negative öffentliche Wahrnehmung der Ergebnisse der INERIS-Studie war daher ein Anlass für die vorliegende nationale Studie. Darüber hinaus ist das die Sicherheit von Batterien selbstverständliche die Grundvoraussetzung für die breite Einführung von Elektrofahrzeugen.

Unabhängig von der öffentlichen Wahrnehmung ist die INERIS-Studie inhaltlich eine gute Basis für die Betrachtung der Sicherheitsproblematik. Die systematisch erfassten sicherheitsrelevanten Problemen im gesamten Lebenszyklus der Batterie worden bei INERIS in einer Risikobewertung anhand von Einzelkriterien dargestellt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgte die ANSI-Studie (ANSI, May 2013), jedoch ohne Risikobewertung, dafür mit Blick auf bereits vorhandene Regularien.

Ziel des Projektes war es, in einem ersten Schritt, bereits gewonnene Erkenntnisse und Regularien zu sichten, Risiken zu identifizieren und nach aktuellen Erkenntnissen zu bewerten. Der Fokus lag dabei auf Deutschland und der nationalen Elektromobilität, was aber keine rein nationale Betrachtungsweise impliziert, da Regulierung und Standardisierung weitgehend im europäischen oder internationalen Rahmen stattfindet. In einem zweiten Schritt wurden Handlungsempfehlungen zum Abbau der noch existierenden Risiken erarbeitet. Diese Handlungsempfehlungen sollen Ministerien, Verbänden, etc. zur Umsetzung unterbreitet werden, um durch relevante Maßnahmen die Risiken zu minimieren.

Das Projekt bestand aus vier Arbeitspaketen. Das erste Arbeitspaket deckt die einzelnen Lebenszyklen der Batterie ab und ist in die fünf Abschnitte Materialien und Zelle, Batterie und Batterie im Elektrofahrzeug, Lagerung und Transport, Nutzung sowie Verwertung unterteilt. Die drei weiteren Arbeitspakete behandeln die Querschnittsthemen Schadensbekämpfung, Dokumentation und Internationale Kooperation.

Im ersten Teil des Projektes wurden für alle Lebensphasen die entsprechenden Risiken identifiziert und bewertet. Dabei wurde durch die Projektstruktur sowie die Querschnittsthemen sichergestellt, dass die einzelnen Arbeitspakete stets den Bezug zum übergeordneten Ziel der sicheren Elektromobilität „von der Wiege bis zum Grab“ haben. Die so identifizierten Risiken wurden mit den bereits vorhandenen Maßnahmen abgeglichen und Defizite identifiziert.

Im zweiten Teil des Projektes wurden die Handlungsempfehlungen in Form spezifischer Vorschläge zur Verringerung der Risiken erarbeitet, wobei die Bewertung die Schwerpunkte setzt. Diese Vorschläge können vielfältiger Natur sein, wie zum Beispiel Abänderung und Ergänzung von bestehenden oder Schaffung neuer Regularien, Vorschläge zu neuen Projekten zum Thema Sicherheit oder Empfehlungen für die verschiedenen betroffenen Akteure.

Die vorliegende Studie „Batteriesicherheit“ ist in erster Linie auf das Wirtschaftsgebiet Deutschland und die Elektro-Mobilität konzentriert. Da die Elektro-Mobilität aber sowohl in der Herstellung als auch in der Anwendung und Entsorgung der Batterien global ist, werden und wurden die Ergebnisse der Studie mit anderen Länder diskutiert.

Die Projektleitung wurde vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Technik Baden-Württemberg (ZSW) wahrgenommen. Experten aus Industrie und anderen Organisationen waren beteiligt. Unterstützt wurde das Projekt durch einen Beirat (siehe auch 5.7) bestehend aus verschiedenen Experten der Industrie und Forschung, unter der Leitung des Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien (KLiB).

4 Hintergrund

Im Rahmen der Emissionsreduzierungen und der Ressourcenschonung hat das Thema Elektromobilität eine gesamtgesellschaftliche Bedeutung, die von der Bundesregierung im Rahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität adressiert wird. Eine ähnlich hohe Bedeutung hat die stationäre Speicherung regenerativer Energien. In beiden Applikationen sind Batterien die Schlüsselkomponente. Aktuell werden international die Produktionskapazitäten großer Zellen stark ausgebaut. Für 2020 wird allein für EV-Batterien weltweit ein Marktvolumen von 30-50 Mrd. EUR erwartet (Anderman, Dr. Menahem, Total Battery Consulting, Inc., 27 January 2016).

Im Mittelpunkt der Batterieentwicklung steht die Lithium-Ionen-Batterie, die zurzeit die höchste spezifische Energie und Leistung sowie eine akzeptable Lebensdauer aufweist. Neben den geforderten elektrischen Parametern und wettbewerbsfähigen Preisen ist die Sicherheit der Batterie eine essentielle Voraussetzung, um eine hohe Akzeptanz der E-Mobilität zu erreichen.

Kontraproduktiv für die schnelle Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen wirken sich Meldungen über Schadensfälle aus. Die überwiegende Zahl von Vorfällen mit Lithium-Ionen-Batterien bezieht sich auf den Konsumerelektronikbereich, teilweise mit Rückrufaktionen mit hohen Stückzahlen. Diese teils plakativen Darstellungen solcher Vorfälle werden oft auch auf den Elektromobilitätsfall extrapoliert. In Bezug auf die weltweite Jahresproduktion von mehreren Milliarden Zellen liegt die Zahl der öffentlich bekannten Schadensfälle jedoch im kaum wahrnehmbaren Bereich. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die bereits heute sehr hohe Qualität und Sicherheit der Zellen und Batterien. Unabhängig davon müssen weitere Anstrengungen unternommen werden, um Zellen und Batterien, insbesondere große Zellen (> 20 Ah), sicher herzustellen und anzuwenden. Dazu ist es erforderlich systematisch zu erheben, welche Aktivitäten bereits unternommen wurden und an welchen Stellen heute noch Lücken bei Sicherheitsthemen bestehen können.

Die Zell- und Batteriehersteller sowie der Automobilindustrie befassen sich bereits umfassend mit dem Thema Sicherheit. Themen wie Parken, Laden, Bergen, Abschleppen oder Verwerten von Elektrofahrzeugen gilt es weiter zu objektivieren. Im Hinblick auf die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen müssen daher die Risiken adressiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

In den verschiedenen Lebensphasen der Batterie gibt es unterschiedliche, spezifische Sicherheitsbetrachtungen aber auch Gemeinsamkeiten. Die Unterschiede liegen vor allem im Bereich der Prävention und die Gemeinsamkeiten auf dem Gebiet der Schadensbekämpfung.

5 Methodik der Sicherheitsbetrachtung

5.1 INERIS-Studie

Die Sicherheitsbetrachtung über die gesamte Lebensphase einer Batterie erfolgte in Anlehnung an die französische INERIS-Studie (INERIS, 2011), in der folgendes Schema (siehe Abbildung 1) verwendet wurde:

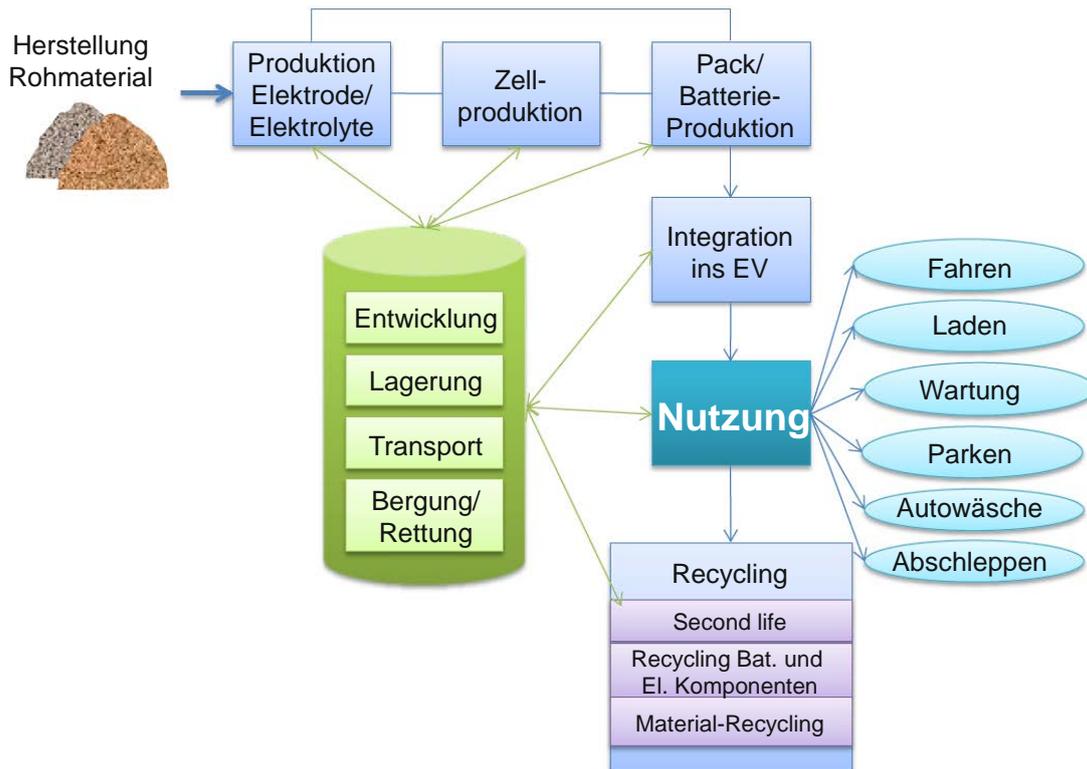


Abbildung 1: Sicherheitsbetrachtung über die gesamte Lebensphase der Batterie (entnommen aus (INERIS, 2011))

Die INERIS-Studie behandelt die gesamte Kette von der Herstellung der Rohmaterialien über die verschiedenen Herstellungsprozesse bis hin zu Materialrecycling. Die Risiken wurden mit zwei Faktoren bewertet. Der erste Faktor definiert die Kritikalität der Risiken (Criticité de ces risques) als Schwere der Folgen im Falle eines Eintretens mit der Bewertungszahl 1 bis 4: 4 = sehr wichtig, 3 = wichtig, 2 = ernst, 1 = gering. Der zweite Faktor steht für die Beherrschung bzw. Eindämmung der Risiken (Maîtrise des risques): 4 = nicht, 3 = schlecht, 2 = gut, 1 = sehr gut beherrschbar.

Die erste Version der INERIS-Studie wurde 2011 veröffentlicht. In der Überarbeitung vom 18.11.2013 wurden zu den ursprünglichen 50 Risiken drei weitere hinzugefügt (51 bis 53). Insgesamt liegen in der Bewertung von INERIS 14 von 53 Risiken im roten Bereich (Kritikalität 3 und/oder 4 und Beherrschbarkeit 3 und/oder 4). Fünf dieser 14 Risiken betreffen den Ladevorgang, jeweils zwei weitere die Bereiche Lagerung und Nutzung. Mit höchstem Risiko wurde die Schnellladung (Punkt 26) vor allem in geschlossenen Räumen bewertet.

Niveau de criticité	4		16	17; 19; 21; 22; 25; 37; 40; 45; 52; 53	26
	3		8; 10; 13; 18; 34; 38	1; 2; 3; 6; 7; 24; 27; 30; 31; 33; 36; 48	4; 20; 23
	2		9; 11; 14; 32; 35; 39; 43; 44	5; 12; 15; 29; 41; 42; 47; 49; 51	28; 46; 50
	1		7bis		
Matrice de criticité		1	2	3	4
		Maîtrise des risques : Besoin de développement de connaissances/compétences			

Abbildung 2: Risikobewertung der INERIS-Studie (Stand 2013), Ziffern beziehen sich auf betrachtete Einzelrisiken

Die Überarbeitung von 2013 hat an der Gesamtbewertung der Einzelrisiken keine wesentliche Veränderung gebracht. Die betrachteten Risiken verteilen sich laut INERIS-Studie wie folgt auf die einzelnen Lebensphasen:

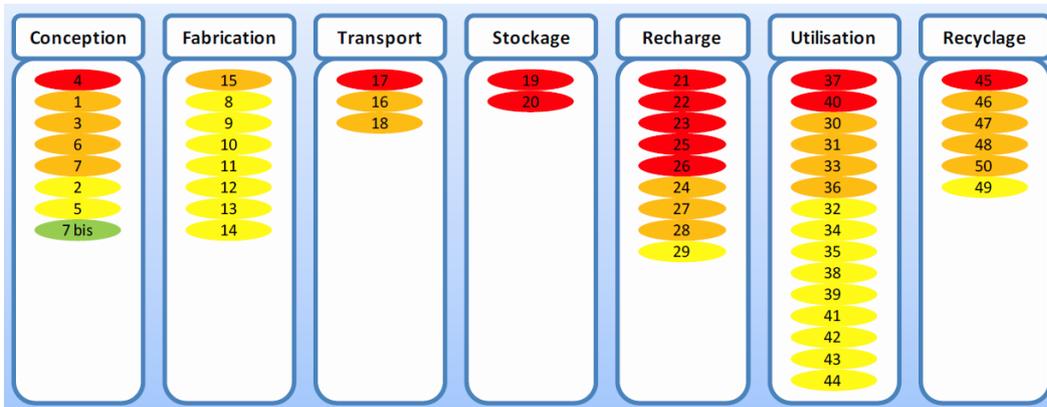


Abbildung 3: Aufteilung in der INERIS-Studie auf die die einzelnen Lebensphasen

5.2 Bewertungsgrundlage

Der Fokus dieser deutschen Studie liegt auf der Bewertung und Analyse der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge, die über den gesamten Lebenszyklus der Batterie gemäß Abbildung 1 auftreten können. Darauf basierend wurden Handlungsempfehlungen formuliert, die die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien weiter erhöhen können. Im Bereich der Beförderung wurden verkehrsträgerspezifische Betrachtungen im Rahmen dieser Studie getroffen.

Im Unterschied zu der INERIS-Studie wurden die Risiken, die sich aus den ersten drei Lebensphasen (Herstellung Rohmaterial, Produktion Elektrode/Elektrolyt und Zellproduktion) für die Hersteller der nachgelagerten Komponenten ergeben, in der vorliegenden Studie nicht betrachtet. Berücksichtigt wurden jedoch die Auswirkungen auf die späteren Lebensphasen, die sich durch Design, Materialien und potentielle Fehler in der Produktion ergeben können.

Die Bewertung der Sicherheit konzentrierte sich in dieser Studie auf seriennahe Fahrzeuge großer Fahrzeughersteller mit einer EU-weit gültigen sog. EG-Gesamtbetriebserlaubnis. Explizit wurden auch keine anderen Verkehrsmittel wie zum Beispiel Elektro-Fahrräder, Busse etc. berücksichtigt. Einzelne Prototypen und einzeln abgenommene Fahrzeuge wurden hier

nicht betrachtet. Eine detailliertere Überprüfung der Einhaltung der Aufbauvorschriften ohne den Nachweis durch eine Vielzahl von Tests ist im Einzelnen von den abnehmenden Stellen zu bewerten. Spezifische Betrachtungen zur Light-Elektromobilität beispielweise aus den Sicherheitsnormen für Pedelecs sind in dieser Studie nicht bewertet worden.

Die Studie behandelt in erster Linie für den Betrieb von Elektrofahrzeugen relevante Themen. Deshalb werden vorsätzliche beziehungsweise illegale Veränderungen am System, die zum Erlöschen der jeweiligen Betriebserlaubnis führen würden, nicht berücksichtigt.

Nicht betrachtet wurden Batteriewechselsysteme von Fahrzeugen, da diese zurzeit wirtschaftlich keine Relevanz haben und auch noch keine Standards vorliegen. Dennoch wurde zur Kenntnis genommen, dass an Standards für Wechselbatterien zumindest gearbeitet wird; gegebenenfalls existieren sogar bereits Standards (unter anderem war China in der Vergangenheit sehr aktiv). Derzeit behandelt wird dieses Thema in der IEC 62840: Electric Vehicle Battery Swap System, T2: Safety Requirements (Draft technical Standard).

In Bezug auf die Zellchemie erfolgte die Bewertung basierend auf dem aktuellen Stand der Technik. Die Bewertungen erfolgten daher explizit nicht auf Basis zukünftiger Entwicklungen wie zum Beispiel Hochvoltmaterialien, Lithium-Schwefel oder Lithium-Luft. Die Einschränkung wurde gemacht, um eine vergleichbare Datenbasis zu gewährleisten.

5.3 Arbeitspakete

Die Bearbeitung dieser Studie erfolgte in folgenden Arbeitspaketen (AP), wobei jedes AP von einem AP-Leiter geleitet wurde:

- AP 1: Lebenszyklus der Batterie
 - AP 1.1 Materialien & Zelle (Dr. Klaus Brandt – Berater)
Zellkomponenten, Brenn-/Entflammbarkeit, Toxizität, Gehäusekonzepte, etc.
 - AP 1.2 Batterie & Batterie in EV (Manfred Herrmann – Adam Opel AG)
BMS, Kühlung, Einbau, Bergungsfähigkeit, Notabschaltung, Isolation, etc.
 - AP 1.3 Lagerung & Transport (Tim Schäfer – Envites Energy)
Maximale Mengen, Brandschutz, ausgefallene und verunfallte Batterien., etc.
 - AP 1.4 Nutzung (Georg Grothues – EA NRW)
Fahren, Parken, Laden, Wartung, Autowäsche, etc.
 - AP 1.5 Verwertung (Tim Schäfer – Envites Energy)
Erfassung/Typenerkennung, Ausbau, Deaktivierung, Recycling, etc.
- AP 2: Schadensbekämpfung (Prof. Jens Tübke – Fraunhofer ICT)
Gefahren (elektrisch, toxisch), Brandfolgen, Energieinhalt, etc.
- AP 3: Dokumentation (Andreas Wagner – ZSW GmbH)
- AP 4: Internationale Zusammenarbeit (Prof. Dr. Jürgen Garcke – FCBAT)

Die AP-Leiter wurden bei der Bearbeitung ihrer Arbeitspakete durch andere Experten aus Industrie und Forschung unterstützt.

Tim Schäfer unterstützte diese Studie bis Ende Oktober 2016. Danach wurden die beiden APs 1.3 und 1.5 vom Projektteam unter Einbeziehung von Industrie-Vertretern aus dem Projektbeirat fertig gestellt.

5.4 Bewertungsmatrix

Die Bewertung und Analyse der Sicherheit von Batterien erfolgte innerhalb einer Bewertungsmatrix. In dieser Matrix sind mögliche Risiken der Batterie nach folgenden Kriterien aufgeführt:

- Zuordnung über laufende Nummer, Arbeitspaket-Nr., Name des Arbeitspakets und Unterpunkt
- Identifizierte Probleme / Risiken
- Ursachen
- Folgen
- **Schweregrad S (1 bis 4)**
- **Eintrittswahrscheinlichkeit P (1 bis 4)**
- **Kontrollierbarkeit C (1 bis 4)**
- **Bewertungskennzahl BKZ als Produkt von S, P und C**
- Bereits vorhandene Maßnahmen zur Beherrschung der Risiken (Stand der Technik, Regularien, Vorschriften, etc.)
- Noch notwendige Maßnahmen zur Beherrschung der Risiken
- Beteiligte Akteure
- Bemerkungen

Grundlage für Bewertung bilden die Kriterien der INERIS-Studie. Zusätzlich dazu wurde ein drittes Bewertungskriterium herangezogen, die Eintrittswahrscheinlichkeit P, um die Bewertung objektiver zu gestalten. Die grobe Einordnung mit Zahlen von 1 bis 4 wurde bewusst nicht weiter unterteilt und folgt damit ebenfalls der INERIS-Studie. Insgesamt erfolgt somit die Bewertung anhand der drei Einzelkriterien S, P und C zur Berechnung einer Bewertungskennzahl BKZ.

Die Bewertungsmatrix ist in Kurzform im Anhang 9.3 dargestellt.

5.5 Definition der Einzelkriterien

Die Bewertung erfolgt auf Basis der Einzelkriterien Schweregrad, Eintrittswahrscheinlichkeit und Kontrollierbarkeit. Diese sind wie folgt definiert:

5.5.1 Schweregrad S

Der Schweregrad S (engl. severity) ist hier wie folgt definiert:

- 1 = gering, Beeinträchtigung der Funktionalität
- 2 = mittel, keine Funktionalität, Schaden ist auf Batterie begrenzt
- 3 = hoch, Sachschaden über die Batterie hinaus
- 4 = höchster Schweregrad, Gefährdung von Gesundheit und Leben

In Bezug auf den Schweregrad S wurde immer von dem höchstmöglichen Schweregrad ausgegangen, wobei dementsprechend die Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit P sich auf diesen höchstmöglichen Schweregrad bezieht. Beispielsweise würde ein Thermal

Runaway* der gesamten Batterie mit dem höchsten Schweregrad S = 4 bewertet werden, weil dabei eine Gesundheitsgefährdung prinzipiell möglich ist. Gleichzeitig kann die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gesundheitsgefährdung als niedrig bewertet werden.

5.5.2 Eintrittswahrscheinlichkeit P

Die Eintrittswahrscheinlichkeit P (engl. probability) ist hier wie folgt definiert:

- 1 = selten
- 2 = mittel
- 3 = häufig
- 4 = sehr häufig

Die Eintrittswahrscheinlichkeit P bezieht sich auf die Betrachtung eines Ereignisses pro Fahrzeug (Serienfahrzeug) und Jahr. Es wurde also explizit nicht auf Basis der in einem Fahrzeug verbauten einzelnen Batteriezellen bewertet, und auch unabhängig von der Größe der Batterie im Fahrzeug. Auf diese Weise wird zum Beispiel die Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen wie Ladevorgänge oder Transporten ebenso je Fahrzeug und Jahr bewertet. Für die Anzahl der Transporte einer Fahrzeugbatterie wird von zwei bis drei Transporten je Fahrzeug-Gesamtlebensdauer ausgegangen (z.B. Anlieferung einer neuen Batterie, Ersatzteilbeschaffung, Transport zur Verwertung nach Ausbau aus dem Fahrzeug). Die Bewertung erfolgte also nicht quantitativ aufgrund einer fehlenden Datenbasis, sondern auf Erfahrungen und Annahmen der Experten.

5.5.3 Kontrollierbarkeit C

Die (technische) Kontrollierbarkeit C (engl. controllability) ist hier wie folgt definiert:

- 1 = leicht, mit geringem Aufwand beherrschbar, kein Einfluss auf die Kosten
- 2 = mit angemessenem Aufwand beherrschbar, geringer Einfluss auf Kosten
- 3 = nur mit hohem Aufwand beherrschbar, erheblicher Einfluss auf die Kosten
- 4 = mit vertretbarem Aufwand nicht beherrschbar, Kosten nicht tragbar

Die Kontrollierbarkeit C wurde rein technisch bewertet. Es erfolgte also explizit keine Bewertung auf Basis von Vorschriften oder Regelungen oder Gesetzen. Beispiel: Die nicht fachmännische Manipulation an einem Fahrzeug wird nicht deshalb mit „leicht kontrollierbar“ (C = 1) bewertet, nur weil dies eventuell verboten ist. Vielmehr wird in diesem Beispiel die Kontrollierbarkeit mit einer höheren Zahl (und damit schlechter) bewertet, da die mutwillige Manipulation technisch nur schwer ausgeschlossen werden kann. Die Kosten für die technische Kontrollierbarkeit erfolgten dabei immer auf Basis von Mehrkosten zum aktuellen Stand der Technik. So wird zum Beispiel ein funktionierendes BMS als Stand der Technik angesehen.

* „Thermal Runaway“ (thermisches Durchgehen) bezeichnet einen sich selbst verstärkenden Effekt innerhalb einer Zelle, der durch eine exotherme chemische oder elektrochemische Reaktion verursacht wird. Das Ergebnis ist meist eine vollständige Zerstörung der Zelle mit Brand und/oder Explosion. Wenn im Falle von Batterien dann noch ein Übertritt auf benachbarte Batterien oder Zellen erfolgt und dort wiederum ein „Thermal Runaway“ verursacht, spricht man von „Thermal Propagation“ (thermisches Ausbreiten).

5.6 Bewertungskennzahl BKZ

Die Bewertungskennzahl BKZ ergibt sich aus dem Produkt der Faktoren Schweregrad S, Eintrittswahrscheinlichkeit P und Kontrollierbarkeit C. Entsprechend kann die Bewertungskennzahl zwischen $BKZ = 1$ und $BKZ = 64$ liegen. Über die mathematische Verknüpfung zur Generierung der BKZ wurde lange und ausführlich diskutiert. Eine Addition wurde länger in Betracht gezogen ebenso wie die Form einer Gewichtung der Einzelfaktoren. Auch die Abbildung der Kosten im Faktor Kontrollierbarkeit wurde bewertet. Einer Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit P stand die Problematik gegenüber, dass verlässliches Zahlenmaterial zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie nicht zur Verfügung stand. Daher wurde die Bewertungskennzahl BKZ mittels Produktbildung ermittelt; dies ist auch die in der Stochastik übliche mathematische Verknüpfung von Wahrscheinlichkeiten ist:

$$BKZ = S \cdot P \cdot C$$

Bei dieser Bewertungskennzahl handelt es sich also um eine Bewertung und nicht um ein faktenbasiertes Risiko (wie z.B. als Ergebnis einer FMEA). Die Bewertungskennzahl ist vielmehr ein Werkzeug innerhalb dieser Studie und damit nicht proportional zu einem Risiko zu sehen.

5.7 Zusammenarbeit mit Gremien

Ein wichtiger Aspekt bei der Erstellung dieser Studie war der Informationsaustausch mit nationalen und internationalen Akteuren und Gremien zum Thema Batteriesicherheit. Die Arbeitspaketleiter waren dazu aufgefordert, zu ihren Themenbereichen weitere Akteure einzubeziehen und bestehende Kontakte zu Gremien aktiv zum Informationsaustausch zu nutzen.

Aus diesem Grund wurde zu Beginn des Projektes der Projektbeirat unter der Leitung von Herrn Dr. Klaus Brandt eingerichtet. Vertreter aus den Ministerien und der Industrie wurden zur Mitarbeit in diesem Beirat eingeladen, um als Multiplikator in die jeweiligen Bereiche zu fungieren. Ebenfalls über Herrn Dr. Brandt war das Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien (KLiB) über die jeweiligen Teilnehmer der KLiB-AG Batteriesicherheit (Leitung Dr. Brandt) eng in diese Studie mit eingebunden. Durch den Beirat und durch die Anbindung an die KLiB-AG Batteriesicherheit wurde der Informationsaustausch mit allen beteiligten Akteuren sichergestellt. Treffen des Projektbeirats fanden an folgenden Terminen jeweils im BMVI/Berlin statt: 27.11.2014, 20.01.2015, 22.07.2015 und 20.01.2016. Treffen der KLiB-AG Batteriesicherheit, in denen über den aktuellen Stand dieser Studie berichtet wurde, fanden an folgenden Terminen statt: 8.07.2013, 18.11.2014, 19.10.2015 und 22.03.2016. Weiterhin wurde am 23.04.2014 im 7. Mitgliederforum KLiB über diese Studie berichtet.

Zwei Workshops fanden innerhalb dieser Studie statt. Ein internationaler Workshop fand am 26.03.2015 am ZSW in Ulm statt. Dieser Workshop diente in erster Linie dem Erfahrungsaustausch mit Projekten zum Thema Batteriesicherheit (näheres dazu siehe 6.8). Die in dieser Studie angewendete Methodik wurde dabei ausführlich diskutiert. Am 21.09.2015 fand am BMVI/Berlin ein zweiter Workshop statt, in dem die vorläufigen Ergebnisse der Risikobewertung einem großen Publikum vorgestellt wurde. Die zahlreichen Teilnehmer dieses Workshops waren allesamt interessierte Akteure im Umfeld der

Elektromobilität, unter anderem OEMs, Industrievertreter, Feuerwehren, Forschungseinrichtungen, Verwertern und Nutzer von EVs.

Die nationalen OEMs waren über den VDA-Arbeitskreis elektrische Traktionsenergiespeicher unter der Leitung von H. Kuhle in diese Studie mit eingebunden. Am 9.06.2015 wurde der aktuell Stand der Studie den Teilnehmern dieses Arbeitskreises vorgestellt und um aktive Rückmeldungen gebeten. In einer Telefonkonferenz am 22.07.2015 wurde der aktuelle Stand erneut den Teilnehmern dieses VDA-Arbeitskreises vorgestellt. Die Rückmeldungen der aus diesem Arbeitskreis sind in die Ergebnisse dieser Studie mit eingeflossen.

Zusätzlich war diese Studie in das Themenfeld Sicherheit der Modellregionen der NOW GmbH eingebunden. Bei der Teilnahme an mehreren Treffen mit anderen Themenfeldverantwortlichen wurde jeweils über den aktuellen Stand dieser Studie berichtet.

Sämtliche Kommentare und Rückmeldungen aus den unterschiedlichen Gremien und von unterschiedlichen Akteuren wurden innerhalb der Autoren dieser Studie diskutiert, und bewertet. Auf diesem Weg konnten die Kommentare, Verbesserungsvorschläge und Rückmeldungen in dieser Studie mit eingebracht werden.

6 Sicherheitsbetrachtung über den Lebenszyklus der Batterie

6.1 Material und Zelle

6.1.1 Bewertungsmethodik

Zurzeit kommen eine Vielzahl von Materialien in Zellen im EV zum Einsatz (siehe Tabelle 1). Mit Ausnahme von Lithium-Kobalt-Oxid (LCO) werden praktisch alle kommerziell hergestellten Kathodenmaterialien wie Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA), Lithium-Manganoxid (LMO) und Lithium-Eisenphosphat (LFP) verwendet. Dabei wird häufig nicht nur ein Material, sondern insbesondere eine Mischung verwendet, zum Beispiel LMO mit NCA oder NMC. Als Anode kommt überwiegend Kohlenstoff (C), zu meist in der Form von Graphit, zum Einsatz. Die Verwendung von Lithium-Titan-Oxid (LTO) in Zellen für BEV wird bis heute noch als eine Ausnahme angesehen. Der Elektrolyt ist in allen Fällen eine Lösung eines zumeist fluorhaltigen Lithiumsalzes in organischen Lösungsmitteln, die leicht entzündlich sind.

Obwohl bekannt ist, dass für sich betrachtet die verschiedenen Zellmaterialien, wie zum Beispiel Kathodenmaterialien, sehr unterschiedliche Reaktionen unter kritischen Bedingungen wie zum Beispiel hohe Temperaturen oder Überladung zeigen, so ist jedoch für die Sicherheit der Zelle das Zusammenspiel aller Komponenten wie Anode, Kathode, Elektrolyt, Separator sowie passive Sicherheitsmaßnahmen verantwortlich. Daher kann eine Bewertung auf der Basis von Materialeigenschaften allein nicht durchgeführt werden.

Die Lithium-Ionen-Zellchemie erfordert ein gasdichtes Zellgehäuse, das entweder aus Metall (Stahl oder Aluminium) oder aus einer mit einer metallischen Sperrschicht versehenen Kunststoffolie besteht. Letztere haben eine flache Bauform und werden als Pouchzellen bezeichnet. Bei Metallgehäusen gibt es zwei Bauformen, zylindrisch und prismatisch. Batterien im BEV bestehen entweder aus einer großen Anzahl zylindrischer Zellen mit relativ kleiner Kapazität oder aus einer geringeren Anzahl von Pouch- oder prismatischen Zellen mit höherer Kapazität (siehe Tabelle 1). Die Bauform, das Gehäusematerial und die Kapazität spielen eine große Rolle beim Verhalten der Zellen unter kritischen Bedingungen.

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Zellchemien und Zelltypen (Tabelle 1) ging eine Einzelbewertung der verschiedenen Systeme über den Rahmen dieser Studie hinaus. Solange ein entflammbarer Elektrolyt verwendet wird, kann außerdem bei keinem der heute zur Verfügung stehenden Materialien eine Entzündung und möglicher Weise ein Thermal Runaway ganz ausgeschlossen werden. Die Bewertung wurde Chemie- und Bauform-neutral durchgeführt. Dabei wurde der Stand der Technik bei Materialien und Zellen zugrunde gelegt. Die beim Umgang mit Materialien und Komponenten in der Material- und Zellfertigung entstehenden Risiken wurden nicht betrachtet. Es wurde letztendlich nur bewertet, was für die darauffolgenden Schritte im Lebenszyklus der Batterie von Bedeutung ist. Das Hauptaugenmerk lag stets auf der Sicherheit des Fahrzeugnutzers und anderer Personen, die während des Lebenszyklus des Fahrzeugs und seiner Batterie mit ihnen in Berührung kommen.

BEV		Zellhersteller	Chemie	Kapazität	Zelltype	Energiedichte	Spezifische Energie
Hersteller	Modell		Anode/Kathode	Ah		Wh/l	Wh/kg
BMW	i3	Samsung SDI	G/LMO+NMC	60	prismatisch	237	126
Coda	EV	Lishen Tianjin	G/LFP	16	prismatisch	226	116
Daimler	Smart	LG Chem	G/NMC	50	pouch	270	140
Fiat	500	Samsung	G/LMC+LMO	64	prismatisch	243	132
Honda	Fit	Toshiba	LTO/NMC	20	prismatisch	200	89
Mitsubishi	i-MEV	Li Energy Japan	G/LMO+NMC	50	prismatisch	218	109
Nissan	Leaf	AESC	G/LMO+NCA	33	pouch	309	155
Opel	Ampera	LG Chem	G/NMC + LMO	16	pouch	276	158
Renault	Zoe	LG Chem	G/NMC-LMO	36	pouch	275	157
Tesla	Model S	Panasonic	G/NCA	3,1	zylindrisch	630	233

Tabelle 1: Beispiele für Zelltypen, die in BEV verwendet werden

Um Zellen für den Einsatz in EV zu qualifizieren, werden eine Anzahl von Sicherheitstests durchgeführt und die Schwere des Verhaltens der Zelle auf einer Skala von 0 bis 7 („EUCAR Hazard Level“, Tabelle 2) bewertet. Die hierzu gehörigen Testbedingungen müssen die Verhältnisse im Fahrzeug abbilden, sind jedoch nicht Teil dieses Projekts. Hazard Levels 4 oder niedriger haben keinen oder nur eine geringe Auswirkung auf die Sicherheit der Batterie. Bei höheren Hazard Levels müssen auf Batterie- oder Fahrzeugebene Vorkehrungen getroffen werden, um den Schaden zu begrenzen.

Unter Mitwirkung von Experten der chemischen Industrie, Batterieherstellern, Anlagenbauern, Automobilherstellern und Instituten wurden Arbeitsgruppen gebildet, um die Risiken zu identifizieren und nach dem oben beschriebenen Schema der Bewertungskennzahl BKZ zu bewerten.

Hazard Level		Classification Criteria, Effect	
accept	0	No effect	No effect, no loss of functionality
	1	Passive Protection activated	No defect, no leakage, no venting, no fire or flame, no rupture, no explosion, no exothermic reaction or thermal runaway, cell reversibly damaged, repair of protection device needed
	2	Defect Damage	No leakage, no venting, no fire or flame, no rupture, no explosion, no exothermic reaction or thermal runaway, cell irreversibly damaged, repair needed
	3	Leakage > 50%	No venting, no fire or flame, no rupture, no explosion, weight loss ≤ 50 % of the electrolyte weight electrolyte = solvent + salt
reject	4	Venting > 50%	No fire or flame, no rupture, no explosion, weight loss ≥ 50 % of the electrolyte weight
	5	Fire or Flame	No rupture, no explosion, i.e. no flying parts
	6	Rupture	No explosion, but flying parts, ejection of parts of the active mass
	7	Explosion	Explosion, i.e. disintegration of the cell

Tabelle 2: Definition der EUCAR Hazard Level

Wie anfangs beschrieben war der Ausgangspunkt dieser Bewertung die INERIS-Studie (INERIS, 2011). Es wurden zunächst zehn für dieses AP „Material und Zelle“ relevante Punkte aus dieser INERIS-Studie identifiziert. Die dort genannten Risiken wurden neu bewertet und es wurde hinterfragt, ob die Liste vollständig ist. Ein Teil wurde nicht übernommen, da diese sich mit Risiken ausschließlich für den Material- oder Zellhersteller beschäftigen, zum Beispiel Risiken beim Handling von Nano-Materialien oder bei der Formation von Zellen. Als neues Risiko wurde der Einfluss der Alterung auf das Sicherheitsverhalten der Zellen identifiziert. In den Arbeitsgruppen wurde dann ein Konsens über die Art und Schwere der Risiken gefunden.

6.1.2 Ergebnisse

Insgesamt wurden in diesem Arbeitspaket „Material und Zelle“ sechs Risiken identifiziert, die im Detail in der Bewertungsmatrix beschrieben sind. Sie decken die Themen Zellentwicklung, Zellfertigung, die Testung und den Betrieb der Zelle als Batteriekomponente ab. Im Folgenden werden die sechs Risiken beschrieben und die Ergebnisse kommentiert. Die angegebene Nummer bezieht sich auf die Bewertungsmatrix.

- #1 - Fehlerhaftes oder ungeeignetes Zelldesign: $S = 3 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 3
 Die Entwicklung der Zelle wird auf die Anwendung und die damit verbundenen Forderungen an das Sicherheitsverhalten abgestimmt. Die Zellen haben einen wohldefinierten Arbeitsbereich, in dem ihr Verhalten aufgrund ausgiebiger Tests dem Zellhersteller und auch dem OEM bekannt ist. Das Verhalten der Zelle außerhalb des Arbeitsbereichs, zum Beispiel bei Überladung, wird in Sicherheitstests abgeprüft. Ein Risiko entsteht dann, wenn diese Vorgehensweise fehlerhaft ist, zum Beispiel weil die Tests nicht die Bedingungen während des Einsatzes der Batterie ausreichend widerspiegeln. In den Arbeitsgruppen wurde ferner darauf hingewiesen, dass sich die Sicherheitseigenschaften von Zellen mit der Alterung verändern. Hier liegen zurzeit noch keine fundierten Informationen vor. Das Risiko einer fehlerhaften Zellentwicklung wird als insgesamt niedrig bewertet (BKZ 3).

- **#2 - Unzureichende Qualitätssicherung: S=3 / P=1 / C=2, BKZ = 6**
Besonderes Augenmerk galt auch den Risiken die ihren Ursprung in Problemen während der Zellfertigung haben. Mangelhafte Qualität der verwendeten Materialien oder unzureichende Qualitätskontrolle während der Produktion kann das Sicherheitsverhalten der Zellen negativ beeinflussen. In Serienfahrzeugen werden Zellen von Herstellern mit hohem Qualitätsniveau verwendet, so dass dieses Risiko als ebenfalls relativ niedrig bewertet wurde (BKZ 6).
- **#3 - Kontamination in der Zelle: S=3 / P=1 / C=3, BKZ = 9**
Ein weiteres Risiko während der Zellfertigung ist die Kontamination der Zelle entweder durch Verwendung von kontaminiertem Material oder durch Kontamination während der Fertigung. Dies kann zu einem internen Kurzschluss im Betrieb führen, der dann zu einem thermischen Durchgehen (Thermal Runaway, TR) der Zelle führen kann. Die Vermeidung dieses Risikos verlangt spezielle Maßnahmen wie zum Beispiel den Ausschluss von metallischem Abrieb in der Material- und Zellfertigung sowie eine strikte Qualitätskontrolle. Die Erfahrung mit Zellen im Konsumelektronikbereich hat gezeigt, dass es nicht möglich ist, dieses Risiko völlig auszuschließen. Es wurde daher innerhalb dieses Arbeitspakets mit der BKZ = 9 am höchsten bewertet.
- **#4 - Tests von Zellen und Batterien: S=4 / P=1 / C=1, BKZ = 4**
Für die Entwicklung von Zelle und Batterie sind zahlreiche Tests notwendig, die Gefahren für das Personal darstellen können, zum Beispiel durch Hochspannung. Diese Tests werden in dazu vorgesehenen Anlagen von Fachpersonal durchgeführt. Schutzvorrichtungen und Ausbildung des Personals wurden als ausreichend betrachtet und daher wurde dieses Risiko mit der BKZ = 4 als niedrig eingestuft.
- **#5 - Ungenügende passive Sicherheitseinrichtungen: S=3 / P=1 / C=1, BKZ = 3**
Um die Sicherheit der Zellen zu erhöhen, werden passive Sicherheitselemente in der Zelle verwendet. Beispiele hierfür sind Separatoren mit keramischer Beschichtung, CID (Current Interrupt Devices) und Sollbruchstellen (Safety Vents). Diese sind Teil der Zellentwicklung und ihre Funktionalität wird durch Sicherheitstests geprüft. Das Risiko einer unzureichenden Auslegung der passiven Elemente wird insgesamt niedrig bewertet (BKZ = 3).
- **#6 - Falsche Betriebsstrategie: S=3 / P=1 / C=1, BKZ = 3**
Die Betriebsstrategie der Batterie ist so ausgelegt, dass die Zelle sich in allen Betriebszuständen in dem für die Zelle zulässigen Arbeitsbereich befindet. Dabei wird beachtet, dass der Arbeitsbereich nicht nur durch Strom und Spannung gegeben ist, sondern von einer Zahl von anderen Parametern wie der Temperatur und dem Alter der Zellen abhängt. Dies wird durch elektrisches und thermisches Management batterie- und fahrzeugseitig gewährleistet. Das Risiko einer falschen Betriebsstrategie wird mit der BKZ = 3 als niedrig bewertet.

6.1.3 Zusammenfassung

Die Risikobetrachtung für Material und Zelle beschränkte sich auf die Risiken, die für die darauffolgenden Stufen des Lebenszyklus und vor allem für Sicherheit des Fahrzeugs von Bedeutung sind. Hierzu wurden die Material- und Zellentwicklung, Zellfertigung und auch die Entwicklung der Spezifikationen für die Zelle betrachtet.

Als Risiko mit der höchsten Bewertungskennzahl BKZ = 9 wurde ein interner Kurzschluss einer Zelle in einer Fahrzeugbatterie aufgrund von unentdeckten Fertigungsfehlern angesehen. Dies kann zu einem Thermal Runaway führen. Als zweithöchstes Risiko mit BKZ = 6 wurde unzureichende Qualitätssicherung angesehen. Weitere Risiken wurden sehr niedrig bewertet.

6.2 Batterie und Batterie in EV

In diesem Arbeitspaket werden sowohl die singulären Batterien als auch das gesamte Batteriesystem im Hinblick auf den Einbau in Fahrzeugen betrachtet. Wie oben beschrieben steht dabei die Bewertung von Serienfahrzeugen entsprechend dem Stand der Technik im Vordergrund. Dem zugrunde liegen entsprechende Entwicklungsprozesse, einschließlich Test- und Prüfprogrammen von großen Automobilherstellern, entwickelt und aufgebaut nach standardisierter technischer Regelwerken.

6.2.1 Bewertungsmethodik

Als zweckmäßige Gliederung dieses Arbeitspaketes wird das Batteriesystem, angelehnt an seinen Aufbau, mit den folgenden Bereichen betrachtet: mechanisch, elektrisch, thermisch, die Systemschnittstellen und die Batterieüberwachung.

Die Schnittstellen des Systems lassen sich weiter unterteilen in: Umwelteinflüsse, EMV, Einwirkungen auf die Batterie (Crash, Feuchtigkeit, Feuer). Die Überwachung kontrolliert den vorgesehenen Betriebsbereich: Belastungsgrenzen, Überladung, Tiefentladung und Temperaturbereich. Sie steuert in der Regel auch die Zell-Ausgleichsladung (Balancing).

Ausgehend vom Stand der Technik, der sich in den Standards und Vorschriften widerspiegelt, wird ein Betrieb der Batterie innerhalb der vorgesehenen Betriebsgrenzen über den gesamten Lebensdauerzeitraum als sicher betrachtet. Eine Vielzahl von vorgeschriebenen Tests dient zum Nachweis der „akzeptierten“ Sicherheit.

Da die Entwicklung von Batteriesystemen natürlich auf deren Nutzung in Elektrofahrzeugen ausgerichtet ist, wurden die meisten Punkte der Arbeitspakete „Batterie und Batterie in EV“ und „Nutzung“ in enger Zusammenarbeit bewertet.

Als Experten bei der Beurteilung wirkten Mitarbeiter aus den Bereichen Elektrofahrzeug und Batterien, Batteriesicherheit, Elektrofahrzeug-standardisierung sowie Batterietransport und Verpackung mit. Die Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket wurden ebenso wie letztendlich das Gesamtergebnis dieser Untersuchung mit Batterieexperten der deutschen OEM im Rahmen des VDA abgeglichen. Aus dieser Diskussion ergaben sich auch weitere Untersuchungspunkte wie zum Beispiel „Langzeitparken (d.h. vergessene Fahrzeuge)“.

Nachfolgende Einflüsse auf das Batteriesystem wurden im Detail untersucht:

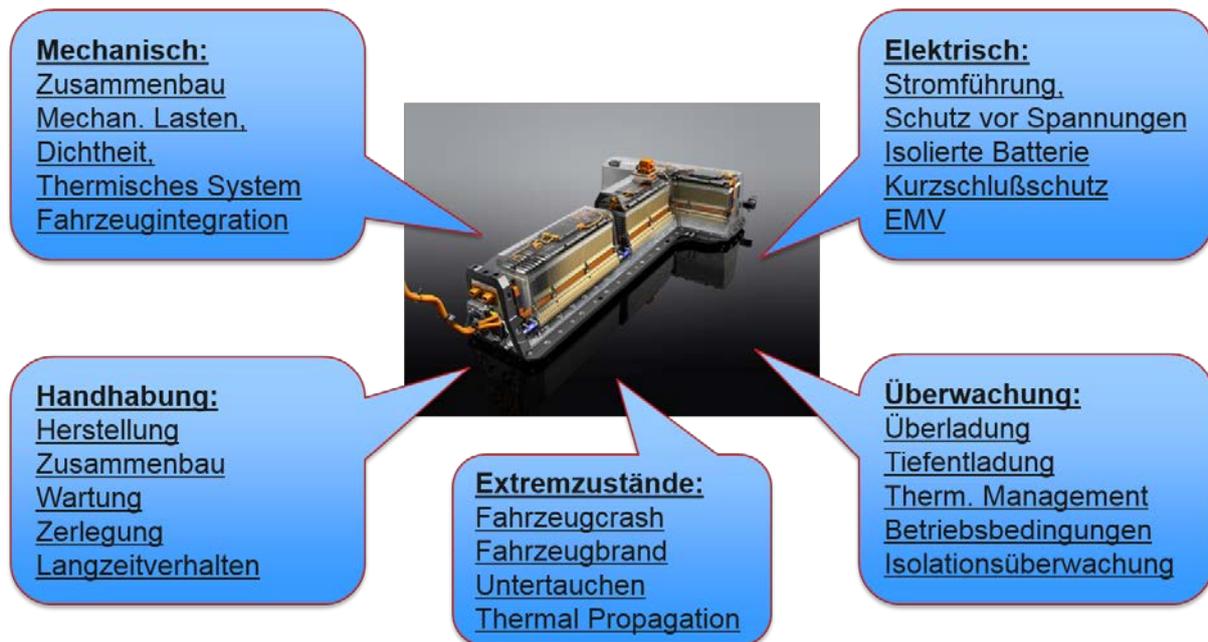


Abbildung 4: Sicherheitsrelevante Einflüsse auf ein Batteriesystem

6.2.2 Ergebnisse

Generell wird die Sicherheit der gesamten Batterie und des Batteriesystems im Elektrofahrzeug betrachtet. So kann zum Beispiel der Einsatz einer Zellchemie mit höherer Energiedichte eine andersartige Überwachung benötigen oder eine reduzierte spezifische Belastung der Zellen geringeren Kühlungsbedarf zur Folge haben. Diese Auslegung liegt in der Hand und der Verantwortung des Batteriesystemherstellers und letztendlich beim Hersteller des Fahrzeugs.

Nach Diskussion im Expertenkreis sowie innerhalb der Projektgruppe stellt derzeit das „nichtautorisierte, unsachgemäße“ Zerlegen beziehungsweise Modifizieren von Batterien mit BKZ = 12 eines der größten Risiken dar (siehe Bewertungsmatrix #24). Durch Manipulation an der geöffneten Batterie und der immanent vorhandenen Hochspannung lassen sich immer Konstellationen vorstellen, die zu lebensgefährlichen Stromeinwirkungen führen können. Auch die unsachgemäße „Reparatur“ eines gebrauchten EVs, zum Beispiel durch Austausch von Batterien, muss an dieser Stelle berücksichtigt werden. Dies zu vermeiden und zu kontrollieren ist für den Hersteller nur bedingt möglich. Allerdings muss dieses Risiko auch unter Alltagsaspekten betrachtet werden.

Den zweiten Punkt mit ebenso hoher BKZ = 12 stellt der Fahrzeugbrand durch externe, nicht von der Batterie verursachte Quellen dar (siehe Bewertungsmatrix #15). Diese Bewertung ergibt sich zum einen aus der generellen Gefährlichkeit eines Brandes zum anderen aus der noch nicht abschließend, beziehungsweise widersprüchlich beurteilten Rauchgaszusammensetzung beim Fahrzeugbrand im Falle einer beteiligten brennenden Batterie.

Prinzipiell gilt, dass der Einbauort im Fahrzeug und der meist kompakte Aufbau der Batterie, teilweise sogar mit Wärmeisolation, erst eine verzögerte Entzündung der Batteriekomponenten und Zellen verursacht und damit für Beteiligte ausreichend Zeit bleibt das brennende Fahrzeug und den Ort zu verlassen.

Selbst im Falle eines Unfalls mit der Folge eines Fahrzeugbrandes bleiben nach vorliegenden Untersuchungen mehrere zehn Minuten bis die Batterie in den Brand einbezogen wird. Wie ebenfalls bei konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeugen stellen die generell austretenden toxischen Gase durch den Fahrzeugbrand das größte Risiko dar.

Unterschiedliche Untersuchungen weisen neben üblichen Brandgasen (z.B. CO, CO₂) auf vorhandenes Fluorwasserstoffgas (HF) in den Rauchgasen bei Zellbränden hin. In wie weit dieses Gas im Falle eines Fahrzeugbrandes mit beteiligter Batterie eine zusätzlich Gefährdung darstellt ist noch nicht abschließend geklärt. HF, das bei manchen Zellbränden im Labor nachgewiesen werden konnte, ist sehr reaktiv und reagiert sehr schnell mit allen zur Verfügung stehenden Materialien (insbesondere metallische Oberflächen) – wie auch Rauchgas.

Das oftmals diskutierte Risiko einer „Thermal Propagation“ (BKZ = 6) (Definition siehe Fußnote *) kann durch entsprechende Auswahl der Zellen, des Überwachungssystems und des geeigneten Systemdesigns gut beherrscht werden. Thermal Propagation bedeutet, dass einzelne fehlerhafte oder falsch betriebene Zellen überhitzen und Nachbarzellen nacheinander ebenso reagieren. Testverfahren zum Nachweis der Beherrschung der „Thermal Propagation“ werden derzeit in internationalem Rahmen in einer „Electric Vehicle Safety - Global Technical Regulation“ (EVS GTR) diskutiert und soll auch in dem Standard ISO 12405 verankert werden.

Einen weiteren diskutierten Punkt stellt das Langzeitverhalten von Zellen dar (BKZ = 4). Hierzu gehen die Expertenmeinungen noch auseinander. Einige gehen von einer Verschlechterung des Sicherheitsverhaltens mit zunehmender Lebensdauer aus, andere sehen eher eine Verbesserung des Sicherheitsverhaltens. Allerdings ist auch bekannt, dass unsachgemäßer Betrieb, zum Beispiel Laden mit zu hohen Strömen bei niedrigen Temperaturen zu Lithium-Plating und internen Kurzschlüssen führen können. Da dies stark abhängig ist von Zellchemie und Zelldesign, ist eine generelle Aussage nicht möglich.

Die weiteren untersuchten Risiken führten zu kleinen Bewertungskennziffern:

- Die Zulassungstests zur Überprüfung der mechanischen Integration überprüfen mechanische Lasten auf die Batterie, die Fahrzeugintegration und die Dichtheit der Batterie gegenüber Feuchtigkeit. Sie sind bereits ausführlich in der Zulassungsvorschrift ECE R100-02 und dem Standard ISO 12405 (Teil 1-3) geregelt. Deshalb ergibt sich hierfür nur eine Bewertungskennzahl von 1.
- Das elektrische Batteriedesign, ihre Stromführungen, der Schutz vor Spannungen und Kurzschlüssen sowie Isolationswiderstand und EMV sind ebenfalls durch umfangreiche existierende Standards und Zulassungstests abgesichert: ISO12405-3, ECE R100 (insbesondere Teil 5), und ISO 6469-3. Die Bewertungskennzahlen im elektrischen Batteriedesign liegen dementsprechend zwischen 1 und 4.

- Auch für die Handhabung der Batterie während Herstellung, der Wartung durch geschultes Personal und der sachgerechten Zerlegung wird das Risiko nur mit 2 bewertet.

Um all diesen Punkten auch im Unfall, Fehlerfall oder Missbrauch Rechnung zu tragen existiert bei Serienfahrzeugen in der Regel ein systemübergreifendes Sicherheitskonzept. Es berücksichtigt Aspekte wie die eingesetzte Zellchemie, die Zellbauform und zellinhärente Sicherheitseinrichtungen, den Modulaufbau und das gesamte Batteriepaket sowie dessen Integration ins Fahrzeug. Das ganze elektrische und thermische System überlagert nach dem Stand der Technik ein Batterie-Kontrollsystem das die Einhaltung der Betriebsparameter der einzelnen Zellen überwacht, die Betriebsgrenzen kontrolliert und die Schnittstelle zum Antriebs- und Ladesystem darstellt.

Die Risiken durch den Betrieb oder Fehler des Überwachungssystems werden ebenfalls mit geringen Bewertungskennzahlen von 2 bis 4 bewertet, da hierzu entsprechende Zulassungsvorschriften in ECE R100 Teil 5, 6 und 7 bereits vorliegen. Im Standard ISO 12405-3 wird der geltende technische Status dokumentiert. Die ISO 26262 beschreibt darüber hinaus die generelle funktionale Sicherheit von Elektroniksystemen und Software für Straßenfahrzeuge.

Die sachgerechte Integration der Batterie bis hin zur Funktion des Sicherheitssystems wird bei Serienfahrzeugen in den Zulassungstests auf Komponentenlevel und Gesamtsystemebene abgeprüft.

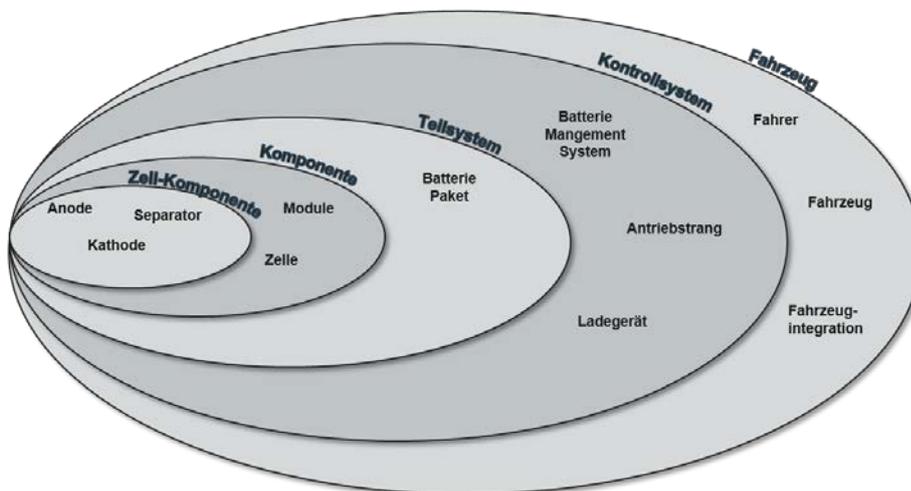


Abbildung 5: Schalen-Sicherheitskonzept fahrzeugintegrierter Batteriesysteme (Galen Ressler, 2014)

6.2.3 Zusammenfassung

Gegenüber der INERIS-Studie werden in dieser Untersuchung nur Serienfahrzeuge betrachtet. Diese werden nach zwischenzeitlich erarbeiteten und geltenden technischen Standards und Vorschriften entwickelt, aufgebaut und geprüft.

Die nicht-fachgerechte Manipulation des Batteriesystems und der durch externe Quellen verursachte Fahrzeugbrand werden mit der größten – aber immer noch niedrigen – BKZ = 12 bewertet. Weitere noch diskutierte Risiken wie „thermal propagation“ und Risiken durch

gealterte Zellen werden als handhabbares Risiko eingestuft. Einheitliche Tests und Zulassungsvorschriften (EVS GTR) dazu werden derzeit in ISO und IEC erarbeitet und global abgestimmt.

Fahrzeugübergreifende Sicherheitssysteme in mehreren Schalen gewährleisten die Einhaltung der Batteriebetriebsparameter und reagieren im Fehler- und Unfall.

6.3 Transport und Lagerung

6.3.1 Transport

6.3.1.1 - Einführung

Die „UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods“ (United Nations, 2015) empfehlen Regeln für die Beförderung von Gefahrgütern. Rechtsverbindlichkeit erlangen die UN-Empfehlungen bei der Übernahme in nationale Vorschriften (z.B. in Deutschland durch die ADR (ADR 2015, 2015) sowie (ADR 2017, 2016) und GGVSEB, in Europa durch Richtlinie 2008/68 über die Beförderung gefährlicher Güter, in USA durch 49 CFR). Eine gute Übersicht zu diesem Thema liefert auch (Busch, Hajo, 2016). Die Gefahrgutvorschriften enthalten insbesondere Anforderungen an die Verpackung, Kennzeichnung, Beförderungsdokument und die Beschaffenheit der Batterien.

Stoffe, Zubereitungen und Gegenständen sind vierstelligen „UN-Nummern“ zugeordnet und in neun Gefahrgutklassen eingeteilt. Bedingungen und Prozesse für die Zuordnung gibt das „Manual of Tests and Criteria“ (United Nations, 2015) vor (Teil der oben genannten UN-Recommendations).

Die folgenden vier Nummern beziehen sich dabei auf lithiumhaltige Batterien im Allgemeinen:

- 3090 LITHIUM-METALL-BATTERIEN (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierung)
- 3091 LITHIUM-METALL-BATTERIEN IN AUSRÜSTUNGEN (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierung)
- 3091 LITHIUM-METALL-BATTERIEN, MIT AUSRÜSTUNGEN VERPACKT (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierung)
- 3480 LITHIUM-IONEN-BATTERIEN (einschließlich Lithium-Ionen-Polymer-Batterien)
- 3481 LITHIUM-IONEN-BATTERIEN IN AUSRÜSTUNGEN (einschließlich Lithium-Ionen-Polymer-Batterien)
- 3481 LITHIUM-IONEN-BATTERIEN, MIT AUSRÜSTUNGEN VERPACKT (einschließlich Lithium-Ionen-Polymer-Batterien)

Alle oben genannten UN-Nummern finden sich in der Gefahrgutklasse 9 „Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände“ (Class 9 – miscellaneous dangerous substances and articles, including environmentally hazardous substances) wieder.

Für die hier vorliegende Studie sind damit vor allem die Lithium-Ionen-Batterie relevanten UN 3480 (Lithium-Ionen-Batterien) und UN 3481 (Lithium-Ionen-Batterien in Ausrüstungen) wichtig. Fahrzeuge selbst sind den UN-Nummern UN 3166 (für Hybridfahrzeug) oder UN 3171 (batteriebetriebene Fahrzeuge) zuzuordnen.

Für die grundsätzliche Zulassung zu Transport und Beförderung müssen Zellen und Batterien den Bedingungen des Kapitel „38.3 Lithium metal and lithium ion batteries“ des „Manual of Tests and Criteria“ (United Nations, 2015) entsprechen. Die Produktion der Zellen/Batterien muss in Übereinstimmung mit Qualitätssystemen, die den Anforderungen des Gefahrgutbeförderungsrechts entsprechen, erfolgen. Eine Zertifizierung durch Dritte ist nicht erforderlich (siehe ADR/RID 2.2.9.1.7). Beschädigte/defekte Batterien, die diese Anforderungen nicht erfüllen, können nur unter besonderen, strengeren Bedingungen befördert werden.

Definiert durch die Gefahrgut-Zuordnung über die jeweilige UN-Nummer unterliegen Lithium-Ionen-Batterien in Abhängigkeit vom jeweiligen Verkehrsträger allgemeinen und besonderen Transportvorschriften,

Einen Überblick über die Organisationen, die für die unterschiedlichen Transportwege weltweit, in Europa und in Deutschland verantwortlich zeichnen, gibt die folgende Abbildung:

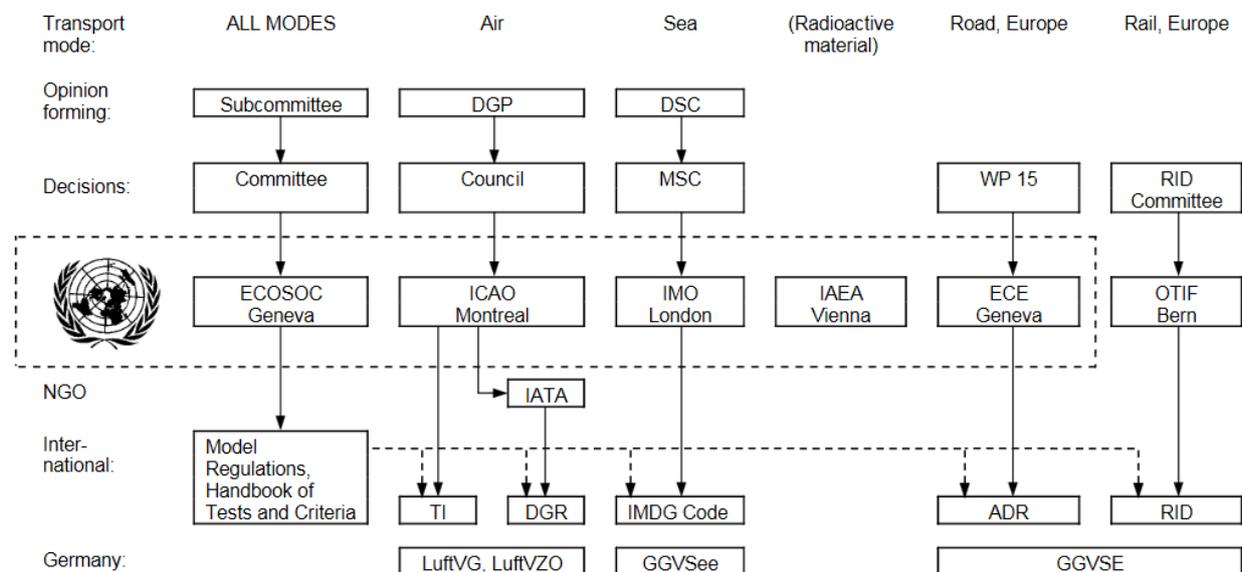


Abbildung 6: Transportwege und verantwortliche Organisationen (Dittrich, 2015)

Insbesondere gilt:

- Straßentransport: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)
- Lufttransport: International Air Transport Association Dangerous Goods Regulations (IATA DGR) und Technische Anweisungen der International Civil Aviation Organization (ICAO-TI) (ICAO-TI, 2015-2016 edition)
- Seetransport: Internationaler Code für die Beförderung von gefährlichen Gütern mit Seeschiffen (IMDG Code)
- Eisenbahntransport: Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID)
- Transport mit dem Binnenschiff: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen (ADN)

- ADR, RID und ADN sind nach der Richtlinie 2008/68 über die Beförderung gefährlicher Güter auch im innerstaatlichen Verkehr verbindlich umzusetzen und durch die GGVSEB in deutsches Recht umgesetzt.

Die Transportvorschriften werden ständig aktualisiert. Die IATA hat für den Lufttransport ab 2016 z.B. verfügt:

- ein Kompletterbot für die Beförderung von Lithium-Ionen-Batterien (UN 3480) als Fracht auf Passagierflugzeugen;
- die Einschränkung für Lithium-Ionen-Batterien bei der Beförderung auf höchstens 30 % Ladezustands (state of charge/ SoC);

EVs können unter den verkehrsträgerspezifischen Bedingungen freigestellt oder unter erleichterten Bedingungen befördert werden. Zum Beispiel unterliegen EVs (UN-Nummer UN3166 „Hybridfahrzeuge“ und UN3171 „batteriebetriebene Fahrzeuge“) nicht den Vorschriften der ADR (siehe ADR Sondervorschrift 240 sowie 2.2.9.1.7).

In diesem Kontext sind keine unmittelbaren Regelungslücken identifiziert worden.

Grundsätzlich ist die Vorbereitung und Durchführung der Beförderungen von Lithium-Ionen-Batterien nur durch sach- bzw. fachkundige Personen bzw. durch unterwiesene Personen zulässig.

Lithiumhaltige Batterien können von Gefahrgutvorschriften freigestellt werden. Dazu ist eine Reihe von Voraussetzungen, Einschränkungen und Auflagen zu berücksichtigen, deren „Sensibilität“ in aller Regel verkehrsträgerbezogen sind. Spezielle Vorschriften bei Freistellungen, Erleichterungen und evtl. Verkehrsträger ergänzen bzw. erweitern die Grundregeln.

6.3.1.2 Kennzeichnung von Lithium-Ionen-Batterien

Die ordnungsgemäße Kennzeichnung von Versandstücken ist beim Transport von Gefahrgut unerlässlich.

Mit den am 1.01.2017 in Kraft tretenden bzw. anwendbaren Änderungen des Gefahrgutrechts wird die Kennzeichnungspflicht für Lithium-Ionen-Batterien dahingehend geändert, dass Versandstücke nach SV 188 des ADR/RID/ADN bzw. des IMDG-Codes mit dem in Abbildung 7 dargestellten Kennzeichen zu versehen sind. In der mit * gekennzeichneten Zeile ist Platz für die UN-Nummer(n), in der mit ** ist Platz für die Telefonnummer, unter der zusätzliche Informationen zu erhalten sind.



Abbildung 7: Neues Kennzeichen für Lithium-Ionen-Batterien

Ebenso wird mit dieser Änderung der neue Gefahrzettel Nr. 9A (siehe Abbildung 8) für Lithium-Ionen-Batterien mit UN-Nummern 3090, 3091, 3480 und 3481 eingeführt. Versandstücke, die nicht in Verbindung mit der SV 188 des ADR/RID/ADN bzw. des IMDG-Codes verpackt und transportiert werden, müssen künftig mit dem neuen Gefahrzettel Nr. 9A (anstelle von Nr. 9) gekennzeichnet werden.



Abbildung 8: Neuer Gefahrzettel Nr. 9a

6.3.1.3 Risikobetrachtung für den Transport (zum Teil auch auf Lagerung übertragbar)

Die vorliegende Studie basiert auf dem Grundsatz, dass unabhängig vom Transportweg und Verkehrsträger immer ein extrem hohes Maß an Sicherheit in der Beförderung gegeben sein muss.

Die INERIS-Studie (INERIS, 2011) hat für den Transport fünf Risiken betrachtet, die zum Teil auch den Bereich der Lagerung inkludieren - Transportunfälle, Transportunfälle in Tunneln, Transport gebrauchter Batterien, Brände bei Lagerung, elektrische und chemische Risiken bei Lagerung.

Diese Risiken wurden in der vorliegenden Studie übernommen und weiter spezifiziert. Im Transportbereich ergeben sich:

- #25 - Unfälle in Transport/Lagerung allgemein und in sensiblen Bereichen: S = 4 / P = 1 / C = 2, BKZ = 8

- #26 – Unfälle in Transport/Lagerung allgemein und in sensiblen Bereichen durch beschädigte/defekte Batterien: S = 3 / P = 2 / C = 2, BKZ = 12

Adressiert werden neben allgemeinen Aspekten von Transport/Lager-Unfällen auch spezifische Aspekte, die in sensiblen Bereichen wie Tunnel, Fähren, Ro/Ro-Schiffe, geschlossen Räume etc. auftreten können.

Der Transport/Lagerung neuer Zellen/Batterien ist bei Beachtung des Regelwerkes beherrschbar. Hohe Aufmerksamkeit ist jedoch dem Transport/Lagerung gebrauchter, insbesondere defekter (Ausfall von Funktionen, z.B. Kapazität < 80 % der Nennkapazität) oder beschädigter (physikalische Beschädigungen z.B. nach Unfall) Batterien zu widmen. Ein hohes Risiko stellen beschädigte Batterien dar, da kaum Aussagen möglich sind, inwieweit mechanische Deformationen zu Separatorbrüchen und folgende Kurzschlüsse führen können. Im Allgemeinen ist beim Transport von beschädigten Batterien von einem höchstmöglichen Gefährdungspotential auszugehen. Restriktionen einer Beförderung hängen vom Grad der Beschädigung/Gefährlichkeit ab; die Beförderung ist ggf. verboten oder nur nach Festlegung spezifischer Verpackungsmethoden (feuerfest, Gasad/absorber, etc.) möglich.

Die potentiellen Risiken sind thermischer, chemischer und elektrischer Natur.

Zur Risikominimierung sind Methoden zu entwickeln, die potentielle Gefahren, die von der Batterie ausgehen, vor dem Transport diagnostizieren können (Fehler-Identifikation). Das trifft insbesondere für den Transport beschädigter Batterien zu.

Es sind für den Transport/Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien Container mit hohem Brandschutz und Verpackungsmaterialien, die eine Brandausbreitung behindern, zu entwickeln, ebenso wie effektive Feuerlöschverfahren, die ohne Halon arbeiten.

Da der Transport von Lithium-Ionen-Batterien nur durch spezielles Personal erfolgt, hat deren Ausbildung eine hohe Priorität.

- #27 – Unfälle allgemein im Cargo-Lufttransport: S = 4 / P = 1 / C = 2, BKZ = 8
- #28 – Unfälle im Cargo-Lufttransport durch beschädigte/defekte Batterien: S = 4 / P = 2 / C = 2, BKZ = 16

Die Risiken „Unfälle allgemein/sensible Bereiche“ (#25) und „beschädigte/defekte Batterien“ (#26) wurden bezüglich des Luftfrachttransport noch einmal spezifisch betrachtet: #27 - Unfälle allgemein im Cargo-Lufttransport; #28 - Unfälle im Cargo-Lufttransport durch defekte Batterien, da insbesondere im Flugzeug von diesen Punkten besondere Gefahren ausgehen können. So wurde zum Beispiel #28 (Lufttransport von beschädigten/defekten Batterien) mit BKZ 16 höher bewertet als der vergleichbare Punkt #26 in einem Fahrzeug mit BKZ 12.

Die unter #27 und #28 genannten Entwicklungen spezieller Transportcontainern und Verpackungsmaterialien, sowie effektiver Feuerlöschverfahren sind im Luftfrachtbereich noch notwendiger. Das trifft ebenso zu auf die Entwicklung von Diagnosemethoden zur Abschätzung des Risikos vor dem Transport aber auch während des Transports, insbesondere von beschädigten Batterien und auch auf eine qualifizierte Aus- und Weiterbildung des Transportpersonals.

Die Risiken von Kurzschlüssen, Bränden und deren Folgen aus oder mit Lithium-Ionen-Batterien im Luftverkehr sind aktuell wieder stärker in der Diskussion. Grund sind nicht nur spezifische Vorkommnisse, sondern auch neuere Untersuchungen (vgl. FAA-USA) die

zeigen, dass bei sogenannten Umverpackungen bei höheren Stückzahlen von Lithium-Ionen-Batterien auch für Flugzeuge Brandgefahren drohen können.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die FAA-Dokumentation wohl Zwischenfälle dokumentiert, diese jedoch im Verhältnis zum Aufzeichnungszeitraum und der in diesem Zeitraum erfolgten extremen Vielzahl von Flügen gering sind. Auch ist der kausale Zusammenhang des Ereignisses mit Lithium-Ionen-Batterien bei jedem Einzelfall kritisch zu betrachten.

Es kann heute festgestellt werden, dass Lithium-Ionen-Batterien insbesondere für automobiler Anwendungen einen sehr hohen Grad an Sicherheit besitzen und somit als beförderungssicher anzusehen sind. Die Elektrofahrzeug-Hersteller betreiben auch aus dem Blickwinkel der Beförderungssicherheit einen vergleichsweise hohen Aufwand, um Nutzer und deren Umgebung vor möglichen Gefahren beim Transport der Lithium-Ionen-Batterien als gefährliche Güter, speziell im Falle eines Unfalles, zu schützen.

Der Stand der Harmonisierung von Vorschriften im Umfeld von Gefahrgütern und speziell von lithiumhaltigen Batterien ist hoch. Die Vorschriften für die internationale Beförderung gefährlicher Güter sind hinsichtlich der multimodalen Vorschriften weitestgehend, auch international vereinheitlicht.

6.3.2 Lagerung

6.3.2.1 - Einführung

Wesentliche Sicherheitselemente für die Lagerung sind mit denen des Transports identisch, wobei während der Lagerung häufig eine deutlich höhere Stückzahl von Zellen/Batterien zu betrachten ist.

Für die Elektromobilität werden Zellen aber auch Batterien in unterschiedlichen Integrationsstufen gelagert. Lithium-Ionen-Batterien müssen so gelagert werden, dass eine mögliche Gefährdung von Mensch und Umwelt ausgeschlossen werden kann. Eine entsprechende grundlegende Gefährdungsbeurteilung für die jeweils konkret gegebene Situation ist hier unumgänglich. Es obliegt jedem Unternehmen geeignete Maßnahmen festzulegen und umzusetzen.

Auch in Fahrzeugen integriert, dürfen Lithium-Ionen-Batterien während Lagerung (und Logistik) keinerlei sicherheitsrelevanten Risiken darstellen.

6.3.2.2 Risikobetrachtungen für die Lagerung

Größen von Batterien für Elektrofahrzeuge variieren aktuell im Bereich von 8 bis 100 kWh, Speicher für Hybridantriebskonzepte und Zweiradfahrzeuge liegen darunter. Eine einzige Palette von zum Beispiel zylindrischen Zellen des Formates 18650 kann über 250 kWh Energieinhalt besitzen. Typische, beispielhafte Größen in der Logistik sind 400 Batterien oder 50 Paletten. So können also Zellen/Batterien mit einem Gesamtenergieinhalt von 12 MWh gelagert werden.

Die Hersteller geben diverse Anweisungen für die Lagerung. So soll vorzugsweise bei einer Raumtemperatur von 20°C bei etwa 20-40% der normalen Kapazität des betreffenden Systems (OCV ca. 3,3-3,9 V/Zelle) gelagert werden.

Empfohlen wird die Lagerung in Originalverpackungen!

Manche Hersteller empfehlen, alle drei Monate den Ladezustand und das Batteriemanagement (BMS) zu prüfen und ggf. nachzuladen. Daimler betreibt sogar ein „Living Storage“ von neuen Batterien im MWh-Bereich in stationären Speichereinheiten (15 MWh System, Daimler und Enercity [Hannover] in Herrenhausen/Niedersachsen) für Stand-by Zwecke. Die Batterien werden bei optimaler Temperatur gelagert und von Zeit zu Zeit entladen und geladen. Frühausfälle können so, bevor die Batterie in das Fahrzeug eingebaut wird, erkannt werden.

Bei der Lagerung ist auch Augenmerk auf Stoffaustritte und Leckagen zu richten (Bersteinrichtung, Ventile, Dichtungen). Besonders wichtig ist die Kontrolle von Zellen, die gerade erst formiert worden sind, da in diesem Fall formationsbezogene Mikroschlüsse auftreten können.

Typische Risiken in Lagerprozessen, wie elektrische Gefahr, Herabfallen und Beschädigungen durch mechanische Einflüsse sind nach jetzigem Diskussionsstand für die einbaufertige Batterie zu vernachlässigen und stellen aufgrund vorhandener Maßnahmen und etablierter Prozesse keine Risikopunkte dar. Werden bei Reparaturen Module ausgetauscht, müssen für die Modullagerung gleiche Sicherheitskriterien gelten.

Bei der Abschätzung der Brandlasten ist auch das Verpackungsmaterial zu bewerten, das in der Regel bei einer Thermal Propagation zuerst brennt.

Entscheidend sind bei einem Brand eine schnelle Detektion (ev. On-line Temperaturmessungen im Zell-Batch). Brandbekämpfung des Entstehungsbrandes sowie die Kühlung des Brandherdes. Zur effektiven Risikominimierung werden häufig Schutzkonzepte, wie beispielsweise automatische Sprinkleranlagen, empfohlen. Aufgrund hoher Brandlasten (Kunststoffbestandteile der Bauteile, Verpackung) und großen Energiegehalte können herkömmliche Sprinkleranlage nicht ausreichend wirken. Sprinkleranlagen mit Wasserverneblungen zeigen bei kleinen Wassertropfendurchmessern wesentlich höhere Kühlkapazitäten (siehe Abbildung 9).

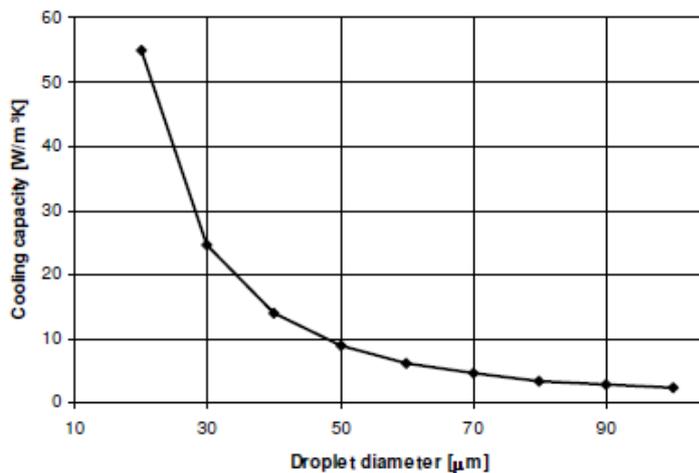


Abbildung 9: Kühlkapazität vs. Wassertropfendurchmesser

Wasser ist das derzeit das empfohlene Löschmittel, das neben einer Abkühlung auch den Luftzutritt zum Brandherd hemmt. Für kleinere Räume kann auch eine CO₂-Löschung eingesetzt werden.

Hohe Löschwassermengen müssten aufgrund der aktuellen Vorgaben aufgefangen werden (Anforderung aus der umweltrelevanten, stofflichen Betrachtung des Elektrolyten und von Reaktionsprodukten des Kathodenmaterials mit dem Elektrolyten). Hierzu besteht die Meinung, dass diese Anforderung kritisch zu hinterfragen ist, wenn es sich um eine kleine Anzahl unregelmäßig gelagerter Batterien handelt, da eine Gefährdung unter Betrachtung der absoluten „geringen“ Konzentration von Schadstoffen in der großen Löschwassermenge wohl eher als gering einzustufen ist. Abweichend davon ist diese Forderung für die regelmäßige Lagerung großer Stückzahlen von Batterien absolut berechtigt.

Weiterhin werden zur Lagerung Räumlichkeiten benötigt, die der DIN 4102 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen entsprechen. Von den üblichen Feuerwiderstandsklassen soll mindestens die Klasse F90 (Funktionserhalt über 90 min; deutsche bauaufsichtliche Benennung: feuerfest) verwendet werden.

Es werden bei der Lagerung auch Möglichkeiten der Brandprävention durch Absenkung des Sauerstoffpartialdrucks durch Fluten der Räume mit Stickstoff angeboten. Durch Absenken der Sauerstoffkonzentration kann man sowohl die Brennbarkeit von Feststoffen ($\leq 15,9\% \text{ O}_2$) und Flüssigkeiten ($\leq 13\% \text{ O}_2$) radikal absenken.

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) gibt in Abhängigkeit von der Masse von Lithium-Zellen/Batterien und deren Energieinhalt Vorgaben für die Lagerung und unterteilt dabei in folgende drei Kategorien, Details dazu siehe (GDV, VdS 3103: 2016-05 (02)):

- **geringe Leistung** (< 2 g Li und ≤ 100 Wh je Batterie): Hierzu zählen unter anderem (kleine) Batterien und einzelne Zellen, welche vornehmlich für den Bereich Computer, Multimedia, Klein elektrogeräte und Kleinwerkzeuge etc. verwendet werden.

- **mittlerer Leistung** (> 2 g Li und > 100 Wh je Batterie, ≤ 12 kg brutto je Batterie): Batterien dieser Kategorie werden z. B. für Fahrräder mit elektrischem Hilfsantrieb, E-Scooter, Light-Electric-Vehicle, größere Gartengeräte, diverse Kleinfahrzeuge aber als Zellen auch für die Fertigung von Batterien hoher Leistung verwendet.
- **hoher Leistung** (> 2 g Li und > 100 Wh je Batterie, > 12 kg brutto je Batterie): Batterien dieser Kategorie sind durch eine besonders hohe Leistung gekennzeichnet, welche sich durch die Kombination und Verknüpfung von Zellen mittlerer Leistung zu einem System ergibt. Derzeit bekannte Einsatzbereiche sind vornehmlich Elektromobilität sowie netzunabhängige Großgeräte.

6.4 Nutzung

Im Arbeitspaket „Nutzung“ wurden die Sicherheitsrisiken von Lithium-Ionen-Batterien in PKWs über alle während der Fahrzeugnutzung auftretenden Einsatzszenarien bestimmt.

6.4.1 Vorgehensweise

Es wurden insgesamt 15 Einsatzszenarien identifiziert, die folgenden Kontexten innerhalb des APs „Nutzung“ wie folgt zugeordnet wurden:

- Batteriesicherheit im Zusammenhang mit Ladevorgängen: Einfluss auf die Batteriesicherheit durch ...
 - ... DC-Schnellladen
 - ... bidirektionales Laden
 - ... extreme Außentemperaturen während des Ladens
 - ... Blitzeinschlag bzw. Überspannungen von außen
- Batteriesicherheit beim Einsatz der Elektrofahrzeuge im Straßenverkehr: Einfluss auf die Batteriesicherheit durch ...
 - ... mechanische Impulse von der Fahrzeugunterseite
 - ... extreme Vibrationen, Beschleunigungen und Umwelteinflüsse
- Batteriesicherheit im Zusammenhang mit technischem Service, Reparatur, technischer Überwachung:
 - Technischer Service und Reparaturarbeiten
 - Technische Hauptuntersuchung (§29 StVZO)
 - Technische Modifizierungen von Elektrofahrzeugen nach Inbetriebnahme (z. B. Tuningkits)
 - Umgang mit Elektrofahrzeugen durch Pannendienste nach einer Fahrzeugpanne
- Elektrofahrzeuge in Autowaschanlagen
- Identifizierung von Elektrofahrzeugen nach einem Unfall
- Analyse der Batteriesicherheit im Verlauf der Lebensdauer des Fahrzeugs
- Einfluss auf Batterie durch Langzeitlagerung (mehrere Jahre, Oldtimerthematik)

Wie in der Einleitung erläutert, wurden ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien in PKWs von Großserienherstellern untersucht, die über eine sog. EG-Gesamtbetriebserlaubnis verfügen. Diese deckt im Vergleich zu anderen Formen einer Betriebserlaubnis (z.B. Einzelbetriebserlaubnis) ein größeres Spektrum an zu prüfenden und zertifizierenden Fahrzeugbereichen ab.

Um eine möglichst breite Datenbasis zu erlangen, wurde ein breites Expertengremium einbezogen, welches zu ihren Erfahrungen mit den jeweiligen Nutzungszuständen interviewt wurde.

Dieses Expertengremium umfasste folgende Bereiche:

- Fahrzeughersteller
- Fachverbände aus dem Bereich Automotive und Kfz-Gewerbe
- Automobilclubs
- Hersteller von Fahrzeugwaschanlagen
- Ladesäulenhersteller
- Unternehmen und Organisationen der technischen Überwachung und Verkehrssicherheit
- Unfallversicherungen

Aufgrund der Heterogenität der einzelnen Akteure fand die Einbindung auf Basis von bilateralen Befragungen statt. Die Befragungen der einzelnen eingebundenen Akteure und Expertengruppen erfolgten durch Fragebögen, telefonischen Interviews oder direkten Befragungen vor Ort.

Mit diesen Befragungen wurden folgende Ziele erreicht:

- Absicherung der vorherigen Recherchen zu den einzelnen Risiken
- Prüfung auf Vollständigkeit bzw. ergänzende Aufnahme von Risiken
- Bewertung des Risikos und der Beherrschbarkeit der einzelnen Risiken durch die Akteure
- Beschreibung des Handlungsbedarfs zur weiteren Verbesserung des Sicherheitsniveaus bei den einzelnen Risiken durch die Akteure (falls Handlungsbedarf vorhanden)

Da es diverse Überschneidungen und Zusammenhänge zu den Arbeitspaketen „Batterie und Batterien in EV“ und „Schadensbekämpfung“ gab, fand im Zuge der Arbeit an den einzelnen Risiken eine enge Abstimmung mit diesen Arbeitspaketen statt.

Gegenüber dem AP „Schadensbekämpfung“ fand dabei folgende Abgrenzung statt: alle Themen, die bis zu einer Fahrzeugidentifizierung im Schadens- bzw. Rettungsfall relevant sind, wurden durch das AP „Nutzung“ abgedeckt. Nachdem im Schadens- bzw. Rettungsfall ein Fahrzeug als Elektrofahrzeug erkannt wurde, geht es um Themen der Schadensbekämpfung, die durch das AP „Schadensbekämpfung“ analysiert wurden. Wichtig ist außerdem, dass in diesem AP „Nutzung“ die Beurteilung der Batteriesicherheit auf einer fahrzeugseitigen Betrachtung beruht. Sicherheitsaspekte, die von der Umgebung, in der sich das Fahrzeug befindet, abhängen, werden ebenfalls im AP „Schadensbekämpfung“ betrachtet, da es hier vor allem um Maßnahmen zur Schadensvorbeugung, Schadenserkenkung und Schadensbekämpfung geht (zum Beispiel Batteriesicherheit in geschlossenen Räumen).

Mit dem AP „Batterie und Batterien in EV“ fand eine intensive Abstimmung statt, da eine Vielzahl von Themen, die während der Nutzung auftreten, bereits im Zuge der Entwicklung und der Fahrzeug- bzw. Komponentenzertifizierung berücksichtigt werden müssen. Einige der bewerteten Risiken werden daher diesen beiden APs „Batterie und Batterie in EV“ und „Nutzung“ zugeordnet.

Die NPE beschreibt in ihrer im Dezember 2014 aktualisierten Normungs-Roadmap Elektromobilität detailliert den aktuellen Status und die weitere geplante Entwicklung der Standardisierungsaktivitäten im Bereich Elektromobilität einschließlich Empfehlungen aus Sicht der NPE.

6.4.2 Ergebnisse

Insgesamt wurden in diesem AP „Nutzung“ 15 Punkte identifiziert, die im Detail in der Bewertungsmatrix beschrieben sind.

Lediglich ein Risiko wurde mit einer Bewertungskennzahl von BKZ > 12 bewertet:

- #36 - Identifizierung von Elektrofahrzeugen nach einem Unfall (S = 4 / P = 2 / C = 2, BKZ = 16):

Es existieren folgende Maßnahmen:

- Fahrzeugidentifizierung über sog. Rettungsdatenblätter der Fahrzeughersteller
- Möglichkeit der Online-Kennzeichenabfrage für Rettungskräfte durch automatisierte Bereitstellung des jeweiligen Rettungsdatenblatts

Darüber hinaus bietet das im Juni 2015 verabschiedete Elektromobilitätsgesetz weitere Identifizierungsmöglichkeiten: Elektrofahrzeuge erhalten bei einer Erstzulassung ab September 2015 ein geändertes Fahrzeugkennzeichen: auf ihnen weist der Zusatzbuchstabe „E“ auf ein Elektrofahrzeug hin (Bundestag, 2015) (analog wie „H“ für historische Fahrzeuge, siehe Abbildung 10). Für E-Fahrzeuge mit ausländischer Zulassung existiert die Möglichkeit der Kennzeichnung durch eine separate Plakette, die auf der Frontscheibe des Fahrzeugs angebracht werden kann (siehe Abbildung 11).



Abbildung 10: Fahrzeugkennzeichen für Elektrofahrzeuge (Quelle: BMVI)



Abbildung 11: Plakette zur Kennzeichnung von Elektrofahrzeugen mit ausländischer Zulassung

Darüber hinaus ist zukünftig mit der EU-weiten Einführung der sog. "E-Call" Funktion eine EU-weite Identifizierung von Fahrzeugen möglich. Diese ist für Neufahrzeuge ab dem 1. April 2018 verpflichtend.

Die verfügbaren Möglichkeiten (Online-Kennzeichenabfrage und automatisierte Bereitstellung der Rettungsdatenblätter) sind jedoch noch nicht bei allen Rettungsleitstellen / Feuerwehren eingeführt.

Folgende Risiken wurden mit einer Bewertungskennzahl von $BKZ \leq 12$ bewertet:

- Mögliche Risiken durch Alterungseinflüsse:
 - #17 – Einflüsse auf die Batteriesicherheit durch Alterung bzw. Langzeitverhalten der Batterie ($S = 2 / P = 1 / C = 1$, $BKZ = 2$)
 - #40 – Einfluss auf die Batteriesicherheit durch Langzeiteinlagerung (mehrere Jahre, Oldtimerthematik) ($S=3$, $P=1$, $C=2$, $BKZ = 6$)
 - Im Rahmen der Zulassungstests werden Alterungsprozesse berücksichtigt. Diese können jedoch nicht das Langzeitverhalten von Batterie bzw. Themen der längerfristigen Fahrzeugeinlagerung vollständig abbilden. Insbesondere zum Thema Oldtimerthematik liegen aufgrund der Tatsache, dass sich Serien-Pkw mit Lithium-Ionen-Batterien von Großserienherstellern erst seit wenigen Jahren im Markt befinden, begrenzte Erfahrungen vor (siehe auch Kapitel 6.2.2).
- Mögliche Risiken durch den Betrieb des Fahrzeugs unter extremen Bedingungen (Temperatur, Schwingungen, mechanischer Impuls etc.):
 - #20 – Einfluss auf die Batteriesicherheit durch Fahrzeugbetrieb bei extremen Temperaturen (Fahren, Laden, Parken) ($S = 2 / P = 1 / C = 1$, $BKZ = 2$)
siehe auch 6.2 und
 - #33 – Einfluss durch Umwelteinflüsse und Fahrbahnbedingungen auf die Batteriesicherheit (Luftfeuchtigkeit, Außentemperaturen, Vibrationen, horizontale und vertikale Beschleunigungen, Fahrbahnunebenheiten und -stöße)
($S = 1 / P = 1 / C = 1$, $BKZ = 1$) und
 - #35 – Einfluss auf die Batteriesicherheit durch Fahrzeugwaschanlagen
($S = 1 / P = 1 / C = 1$, $BKZ = 1$) und
 - #32 – Batterieschäden durch mechanischen Impuls von der Fahrzeugunterseite
($S = 3 / P = 1 / C = 3$, $BKZ = 9$):
 - Auch hier gelten ebenfalls die bereits unter 6.2.2 getroffenen Aussagen: Im Rahmen der Zulassungstests wird der Schutz der Batterie vor mechanischen, thermischen sowie luftfeuchtigkeitsrelevanten Lasten geprüft. Sie sind bereits ausführlich in der Zulassungsvorschrift ECE R100-02 und dem Standard ISO 12405 (Teil 1-3) geregelt. Die ISO 26262 beschreibt außerdem die generelle funktionale Sicherheit von Elektroniksystemen und Software für Straßenfahrzeuge. Die sachgerechte Integration der Batterie bis hin zur Funktion des Sicherheitssystems wird bei Serienfahrzeugen in den Zulassungstests auf Komponentenlevel und Gesamtsystemebene abgeprüft. Darüber hinaus werden in der deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0 (Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), 2014) Empfehlungen ausgesprochen: in Empfehlung 4.3.4.1 wird hinsichtlich der Umgebungsbedingungen für elektrische und elektronische Systeme eine Prüfung der Notwendigkeit einer

Ausweitung und Anpassung von ISO 16750 an Elektrofahrzeuge empfohlen. Außerdem wird im Rahmen dieser Empfehlung u. a. der Hinweis gegeben, dass folgende derzeit laufende Projekte ebenfalls zu berücksichtigen und unter deutscher Federführung zügig abzuschließen sind: ISO/AWI 19453 „Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment for drive system of electric propulsion vehicles“ und ISO/AWI PAS 19295 „Electrically propelled road vehicles – Specification of voltage sub classes for voltage class B“. Insgesamt werden diese Risiken als handhabbar eingestuft.

- Mögliche Risiken durch Ladetechnologien:
 - #21 – Einfluss auf die Batteriesicherheit durch Schnellladung (AC und DC) ($S = 4 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 4) und
 - #30 – Einfluss durch bidirektionales Laden auf die Batteriesicherheit ($S = 4 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 4):
 - Das elektrische Batteriedesign, ihre Stromführungen, der Schutz vor Spannungen und Kurzschlüssen sowie Isolationswiderstand und EMV sind durch umfangreiche Standards und Zulassungstests abgesichert: ISO12405-3, ECE R100 (insbesondere Teil 5), und ISO 6469-3. Im Hinblick auf mögliche Risiken zur Batteriesicherheit durch DC-Schnellladen bzw. bidirektionales Laden wird auf die übergreifenden Funktionen des Batterie-Kontrollsystems verwiesen, das die Einhaltung der Betriebsparameter der einzelnen Zellen überwacht, die Betriebsgrenzen kontrolliert und die Schnittstelle zum Antriebs- und Ladesystem darstellt. Die Risiken im Zusammenhang mit Schnellladung bzw. bidirektionaler Ladung auf die Batteriesicherheit werden als relativ niedrig bewertet.

Beschreibung weiterer einzelner Risiken:

- #29 – Einfluss auf die Batteriesicherheit durch Blitzeinschlag bzw. Überspannung ($S = 3 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 3):

Neben den bereits o.g. Punkten zum Thema Spannungen kann hier noch folgendes ergänzt werden: Gemäß der deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0 von 2014 gilt beim AC-Laden für die Ladeschnittstelle Überspannungskategorie II. Fahrzeuge sind ebenfalls als Geräte nach Überspannungskategorie II ausgelegt. Beim Übergang vom von Blitzschutzzone 0 (Außenbereich) in Blitzschutzzone 1 (Innenbereich) ist ggfs. ein Überspannungsschutz vorzusehen. Der DKE/GAK 353.0.4 ist zu dieser Thematik beauftragt und soll dies bei der Überarbeitung der IEC 61851-1 berücksichtigen bzw. bei Bedarf eine entsprechende Abstimmung mit anderen Gremien vornehmen. Beim DC-Laden werden die Anforderungen an der Schnittstelle zum Fahrzeug in der IEC 51851-23 zu beschreiben. Der DKE/GAK 353.0.2 ist damit beauftragt und wird dies im Rahmen der Überarbeitung der IEC 61851-23 berücksichtigen. Bezüglich der Normung wird seitens der NPE derzeit kein akuter Handlungsbedarf über die Festlegungen der IEC 61851 hinaus gesehen. Die Risiken auf die Batteriesicherheit durch Blitzeinschlag bzw. Überspannung werden als relativ niedrig bewertet.
- #34 – Einfluss auf die Batteriesicherheit durch die Fahrzeugumgebung ($S = 4 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 4):

Im Hinblick auf die Batteriesicherheit ist es von untergeordneter Relevanz, ob sich das Fahrzeug in offenen oder geschlossenen Räumen (z. B. in Tunneln, auf Fähren, in

Parkhäusern/Tiefgaragen) befindet. Allerdings ist es für die Schadensbekämpfung von hoher Relevanz, ob sich das Fahrzeug im Schadensfall in einem offenen oder geschlossenen Raum befindet. Daher wird diese Thematik unter dem Aspekt Schadensbekämpfung im Kapitel 6.6.8 beschrieben.

- #37 – Einflüsse auf die Batteriesicherheit durch Service- und Reparaturarbeiten (S = 4 / P = 1 / C = 2, BKZ = 8):
Es bestehen umfassende Vorgaben zur Ausbildung und Qualifizierung von Personal, das Wartungs- und Reparaturarbeiten an Elektrofahrzeugen durchführen darf. Beispielhaft sei hier die „Information: Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen“ der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung genannt (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), April 2012). Diese Information findet Anwendung auf die Qualifizierung von Personen, die Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen und deren Komponenten ausführen. Die Risiken auf die Batteriesicherheit durch Service- und Reparaturarbeiten werden basierend auf den vorgeschriebenen umfassenden Qualifizierungsstandards als relativ gering bewertet.
- #38 – Maßnahmen im Bereich der technischen Hauptuntersuchung (§29 StVZO) zur Untersuchung der Batteriesicherheit (S = 2 / P = 1 / C = 2, BKZ = 4)
Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen hat die FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH den Änderungsbedarf bei der technischen Hauptuntersuchung gemäß § 29 StVZO von Elektrofahrzeugen im Rahmen der Studie „Elektrofahrzeuge: Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung“ untersucht (Beyer, 2013). Gemäß dieser Studie sind die Vorschriften in Bezug auf Elektrofahrzeuge im Wesentlichen ausreichend. Die Ergebnisse erlauben jedoch eine Ableitung von gezielten Änderungsvorschlägen für künftige Vorgaben und Untersuchungspunkte für die technische Hauptuntersuchung. Eine geeignete Möglichkeit stellt für einen Großteil der Untersuchungen die Nutzung von Diagnosedaten dar.
- #39 – Risiken im Bereich der Batteriesicherheit durch falsches Handling der Fahrzeuge im Rahmen der Pannenhilfe (S=2, P=1, C=2, BKZ = 4)
Pannendienstmitarbeiter sind darauf geschult, Elektrofahrzeuge zu erkennen. Die relevanten Hinweise zum Abschleppen bzw. Bergen von Elektrofahrzeugen sind in der jeweiligen Bedienungsanleitung des Elektrofahrzeugs bzw. Rettungsleitfäden (z. B. BMW) vorhanden. Die Risiken zur Batteriesicherheit im Zusammenhang mit Arbeiten im Zusammenhang mit der Pannenhilfe werden als gering eingestuft. Dieser Punkt berücksichtigt die Risiken im Rahmen der Pannenhilfe. Weitere Informationen zum Bergen von Fahrzeugen im Zusammenhang mit Unfällen werden in Kapitel 6.6.9, 6.6.10 und 6.6.11 (Schadensbekämpfung) gegeben.
- # 24 Modifizierungen im Batteriebereich (S = 4/P = 1/ C = 3, BKZ = 12):
Siehe dazu Punkt Kapitel 6.2.2 „Batterie und Batterie im EV“.

6.5 Verwertung

6.5.1 Einführung

Lithium-Ionen-Batterien altern sowohl über die Zeit als auch durch die Nutzung und verlieren dabei einen Teil ihrer Kapazität sowie ihre maximale Leistungsfähigkeit. Die Geschwindigkeit der Alterung hängt von vielen Faktoren ab, wie zum Beispiel der Umgebungstemperatur während des Stillstands des Fahrzeugs oder den Bedingungen beim Laden und Nutzen des Fahrzeugs. Der Verlust der Kapazität schreitet im Allgemeinen graduell, d.h. mehr oder weniger linear über die Zeit, voran. Ein plötzliches Versagen durch Fertigungsfehler auf Zell- oder Batterieebene kann allerdings nicht völlig ausgeschlossen werden.

Die Automobilindustrie spezifiziert die Batterien so, dass der Kapazitätsverlust innerhalb der Nutzungsdauer im Fahrzeug maximal 20% in Bezug auf die Nominalkapazität beträgt. Die Leistung der Batterie wird so überdimensioniert, dass es während der Nutzungsdauer nicht zu einer Verminderung der Fahrleistungen wie der Beschleunigung des Fahrzeugs kommt. Am Ende der Nutzung einer Batterie im Fahrzeug besteht die Möglichkeit einer Weiterverwendung (Second Use). Am Lebensende, d.h. entweder nach der Erst- oder Zweitverwendung, muss die Batterie recycelt werden.

Das Konzept des Second Use beruht auf der experimentellen Beobachtung, dass Lithium-Ionen-Batterien ihre Kapazität nach dem Erreichen des 80%-Kriteriums auch weiterhin nur graduell verlieren und die Lebenserwartung bis zum Erreichen eines 60%-Kriteriums ähnlich lang ist wie in der ersten Phase, allerdings mit verringerter Kapazität und Leistungsfähigkeit. Als Anwendung für Batterien aus der Automobilanwendung bieten sich stationäre Anwendungen an, wie zum Beispiel die Zwischenspeicherung von erneuerbaren Energien. Hierzu werden zum Beispiel die aus dem Fahrzeug entnommenen kompletten Batterien zu wesentlich größeren Einheiten zusammengeschaltet. Hierbei kommen das BMS, die Sicherheitsvorrichtungen in der Batterie und das Kühlsystem der ursprünglichen Fahrzeugbatterie zum Einsatz.

Die Europäische Union hat seit 1991 mehrere Richtlinien zum Thema Batterierecycling herausgegeben. Aktuell ist die RL 2006/66/EG in Kraft, geändert durch die RL 2008/12/EG vom 11. März 2008, wonach unter anderem Hersteller von Fahrzeugbatterien an einem Sammel- und Verwertungssystem teilnehmen müssen. In Deutschland gilt auf dieser Grundlage das deutsche Batteriegesetz für alle Hersteller und Importeure von Batterien und batteriebetriebenen Produkten, sofern die Hersteller ihre Produkte auf dem deutschen Markt in Verkehr bringen.

Zum Recyceln müssen die Batterien eingesammelt und zur Recyclingstelle transportiert werden. Für den Transport zur Sammelstelle, die Lagerung dort und den Transport zum Recyceln gelten die Bestimmungen und die Risiken aus dem Kapitel 6.3, wobei vor allem die Hinweise auf die Behandlung von beschädigten Batterien zu beachten sind.

Verschiedene Prozesse zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien sind bereits entwickelt worden und befinden sich im Einsatz. Der Prozess des Recyclings und dessen Gefahrenpotentiale sind nicht Gegenstand dieser Studie. Bei der Wiederverwendung der

recycelten Materialien ist darauf zu achten, dass diese den gleichen Qualitätsstandards entsprechen wie die ursprünglich eingesetzten Materialien. Zum Beispiel kann eine Kontamination von diesen Materialien mit Metallpartikeln zu internen Kurzschlüssen führen, siehe hierzu #3 (Kontamination von Zellmaterialien oder Komponenten) in der Bewertungsmatrix.

6.5.2 Ergebnisse

Es wurden insgesamt die zwei folgenden Risiken identifiziert und bewertet:

- #41 – Wiederverwendung (Second Use) von Fahrzeugbatterien

$S = 2 / P = 2 / C = 1$, BKZ = 4

Für die Wiederverwendung (Second Use) von im Fahrzeug genutzten Batterien in anderen Anwendungen ergeben sich eine Reihe von Fragen, die die Sicherheit der erneuten Nutzung betrifft, siehe auch (Sebastian Fischhaber, 2016). So müssen zum Beispiel die Anforderungen der neuen Anwendung an die Eigenschaften einer gealterten Batterie, wie zum Beispiel niedrigere Belastbarkeit angepasst werden.

Im Fahrzeug können die Batterien sehr unterschiedlichen Betriebsbedingungen ausgesetzt sein. Es ist daher notwendig, eine Auswahl unter den vorhandenen Altbatterien zu treffen, um die Sicherheit und die Zuverlässigkeit des Speichers in der neuen Anwendung zu gewährleisten. Hierzu können die Informationen über den SOH, Störfälle usw., die von dem BMS der Batterie und vom Fahrzeug gesammelt wurden, dienen. Dazu ist es erforderlich, dass diese im BMS hinterlegt sind und an der Batterie abgefragt werden können.

Durch die Alterung ändern sich nicht nur die Kapazität, sondern auch andere Eigenschaften der Zellen. Inwieweit sich die Sicherheitseigenschaften der Zellen verbessern oder verschlechtern wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Auf dieses Risiko wurde bereits im Kapitel 6.2 und #17 (Einflüsse auf die Batteriesicherheit durch Alterung bzw. Langzeitverhalten der Batterie) in der Bewertungsmatrix hingewiesen. Hier kommt noch erschwerend hinzu, dass es sich um eine Verlängerung der Nutzung über das übliche Kriterium des Lebensendes bei 80% Restkapazität hinaus handelt. Hierzu gibt es wesentlich weniger Informationen als zum ersten Lebensabschnitt einer Zelle.

Zurzeit verfolgt die Automobilindustrie eine Anzahl von Projekten, die ihre gebrauchten Batterien Zweitanwendungen zuführen. Dabei wird vorrangig an Großspeichern im MWh-Bereich gearbeitet. Beispiele hierfür sind der 13 MWh stationärer Speicher in Lünen, NRW, eine Zusammenarbeit von Daimler, The Mobility House, GETEC und Remondis und ein 2,8 MWh Speicher in Hamburg von Vattenfall, BMW und Bosch. Hiermit sollen die notwendigen Erfahrungen auch über die Sicherheitsaspekte des Second Use gesammelt werden. Die Wiederverwendung von Batterien durch den Fahrzeughersteller oder durch andere in Zusammenarbeit mit dem Fahrzeughersteller wird als relativ unkritisch gesehen und mit einer BKZ von 4 bewertet.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei einer Zweitverwendung von Fahrzeugbatterien durch Dritte, die z.B. keinen Zugriff auf die BMS-Informationen haben und nicht über die Erfahrung der Fahrzeughersteller verfügen, das Risiko höher bewertet werden muss. Auch wenn nach Abschluss der Projekte Erfahrungen über den Second Use in stationären Anwendungen vorliegen, so kann dies nicht ohne weiteres auf andere Anwendungen übertragen werden.

- # 42 – Transport und Lagerung von Batterien, die zum Recyceln bestimmt sind
S=2 / P=2 / C = 2, BKZ = 8
Das Thema des Transports und der Lagerung wurde bereits in 6.3 betrachtet, inklusive der Handhabung defekter und beschädigter Batterien. Die Batterien, die zum Recyceln bestimmt sind, haben sehr unterschiedliche Historien und folglich auch sehr unterschiedliche Eigenschaften, was sich auf die Sicherheit einzelner Batterien auswirken kann. Ferner ist zu erwarten, dass erhebliche Mengen dieser Batterien gemeinsam transportiert und gelagert werden. Inwieweit dies ein höheres Risiko im Vergleich zu dem Transport und der Lagerung von Batterien im Auslieferungszustand darstellt, hängt nicht zuletzt wiederum von der Veränderung der Zelleigenschaften mit der Alterung zusammen, siehe #17 (Einflüsse auf die Batteriesicherheit durch Alterung bzw. Langzeitverhalten der Batterie) in der Bewertungsmatrix.

6.5.3 Zusammenfassung

Nach dem Ende der Nutzung im Fahrzeug können die Batterien einer weiteren Verwendung, zum Beispiel als stationäre Speicher, zugeführt werden. Inwieweit sich aus der Zweitverwendung ein erhöhtes Risiko im Vergleich zu nicht gealterten Batterien ergibt, bedarf der Klärung, da es hier unterschiedliche Informationen gibt. Bei Berücksichtigung der der Historie der Batterien, wie sie im BMS bzw. im Fahrzeug gespeichert ist, wird das Risiko des Second Use mit BKZ 4 als niedrig eingestuft.

Am Ende des nutzbaren Lebens werden die Batterien dem Recycling zugeführt. Es wird ein etwas höheres Risiko mit BKZ 8 beim Sammeln, Lagern und Transportieren gesehen, da hier größere Zahlen von Batterien mit unterschiedlicher Historie und daher möglicherweise unterschiedlichem Sicherheitsverhalten gehandhabt werden.

6.6 Schadensbekämpfung

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Bewertung der Schadensbekämpfung der betrachteten Einzelrisiken. Zur Bearbeitung wurden Gespräche mit Vertretern von Hilfs- und Rettungsorganisationen geführt, die im Falle eines Ereignisses direkt und als erstes an einem verunfallten Elektrofahrzeug oder Hybridfahrzeug tätig werden. Die befragten Experten setzten sich aus der Forschungsstelle für Brandschutztechnik des KIT, Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Hochschule Furtwangen, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), ADAC sowie DEKRA zusammen. Weitere wesentliche Beiträge ergaben sich aus dem am 21. September 2015 durchgeführten Workshop im BMVI mit Beteiligung der Feuerwehr Hamburg, Feuerwehr Berlin und dem Lehrstuhl für Abwehrenden Brandschutz der Bergischen Universität Wuppertal.

Zur Bewertung der Risiken bzw. daraus resultierenden Folgen, Auswirkungen und Ableitung der Relevanz für die tätig werdenden Einsatzkräfte wurden diese mit den sogenannten Gefahren der Einsatzstelle verglichen und die aus einem Risiko entstehenden Auswirkungen einer möglichen Gefahr zugeordnet.

Für den Bereich Schadensbekämpfung im Kontext Lithium-Ionen-Batterie werden folgende prinzipielle Gefahren betrachtet:

- **Ausbreitung:** Ausbreitung eines Brandes und des Brandrauches
- **Brandlast:** Aufgrund brennbarer Materialien in der Batterie/Zelle
- **Atemgifte:** Gifte, die durch die Atmung inkorporiert werden können
- **Chemische Gefahren:** Aus chemischen Eigenschaften resultierende Gefahren wie Verätzung, Korrosion und Vergiftung
- **Elektrizität:** Schädliche Einflüsse auf den menschlichen Körper durch Stromfluss bzw. hohe Spannungen
- **Explosion:** Gefährdung durch Wurfstücke

Es wurde generell im Bereich Schadensbekämpfung nur ein Risiko mit einer Bewertungskennzahl von $BKZ \geq 12$ bewertet:

- #36 - Identifizierung von Elektrofahrzeugen nach einem Unfall ($S = 4 / P = 2 / C = 2$, $BKZ = 16$)

Die wesentlichen Gefährdungen für Einsatzkräfte im Schadensfall sind die Ausbreitung von Brandes, Atemgifte und andere chemische Gefahren, insbesondere in geschlossenen Räumen. Diese kommen dann zum Tragen, wenn sich in der Batterie ein Thermal Propagation ereignet und unkontrolliert größere Mengen an Gas, Hitze und chemische Substanzen freigesetzt werden.

6.6.1 Ausbreitung eines Brandes und Brandrauch

Eine Gefährdung durch die Ausbreitung des Brandes und der Brandgase treten bei jedem Brandereignis auf. Einsatzkräfte sind darauf geschult diese Gefahr zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zur Eindämmung eines Brandes zu treffen.

6.6.2 Atemgifte

Im Falle einer größeren Leckage einer Lithium-Ionen-Batterie (z.B. infolge eines Brandes) werden gesundheitsschädliche Gase und Partikel freigesetzt. Einen umfassenden Schutz vor diesen Schadstoffen bietet der sogenannte Umluft unabhängige Atemschutz (Pressluftatmer). Dieser wird standardmäßig bei Brandereignissen von den Einsatzkräften getragen und steht flächendeckend bei den deutschen Feuerwehren zur Verfügung. Des Weiteren können Atemgifte durch Wasser niedergeschlagen werden.

6.6.3 Freisetzung von Gasen bzw. Bewertung der Toxizität

Aufgrund der Zellchemie ist eine toxische Gefährdung von Einsatzkräften durch Leckagen oder durch einen Brand der Batterie grundsätzlich gegeben. Besonders die Problematik der Bildung von Fluorwasserstoff kann hier zu Komplikationen führen und stellt ein nicht unwesentliches Gefährdungspotential dar. Hier herrscht eine gewisse Verunsicherung welche Maßnahmen zum Schutz der Einsatzkräfte bei einem Ereignis (Brand oder Leckage) zu treffen sind. Bisherige Einsätze mit Lithium-Ionen-Batterien, die in Brand geraten sind zeigen, dass diese oftmals als Gefahrguteinsatz mit der maximalen Schutzstufe für die Einsatzkräfte (Chemikalienschutzanzug, Einrichtung einer Dekontaminationsstelle) mit sehr hohem materiellem und personellem Aufwand abgearbeitet werden.

6.6.4 Chemische Gefahren

Diese Gefährdung ergibt sich durch die in den Lithium-Ionen-Zellen verwendete Zellchemie und insbesondere durch das verwendete Leitsalz LiPF₆ und kanzerogene Kathoden-Materialien. Im Schadensfall kann durch Hydrolyse ätzender Flurwasserstoff entstehen sowie in Folgereaktionen mit weiteren Stoffen in den Zellen und der Batterie weitere toxische Verbindungen. Viele dieser Verbindungen lassen sich aber auch im Brandgas konventioneller Fahrzeuge finden, so dass die dadurch mögliche Gefährdung von Einsatzkräften bereits heute eine geeignete Schutzkleidung erfordert.

6.6.5 Löschmittel

Als geeignete Löschmittel für brennende Lithium-Ionen-Batterien wurde von den befragten Experten Wasser, Netzwasser (Wasser+0,1% Schaummittel) sowie Wasser mit gelbildenden Additiven genannt. Speziell Wasser muss in ausreichenden Mengen eingesetzt werden, um ausreichend Kühlwirkung zu erzielen. Kohlendioxid sowie Löschpulver werden als ungeeignet angesehen, da deren Wärmebindungsvermögen zu gering ist um eine in Brand geratene Batterie eines Elektrofahrzeuges effektiv zu löschen. Wasser ist das Standardlöschmittel bei den Feuerwehren und steht im Regelfall innerhalb kurzer Zeit in ausreichender Menge zur Verfügung. Die Vorhaltung von speziellen Additiven (F500 vgl. Dekra Studie) wird von den Experten kritisch gesehen, da die Bevorratung von speziellen Löschmitteln für die Kommunen zusätzliche Kosten verursachen würde und bei der momentanen geringen Anzahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland nicht gerechtfertigt sei.

Insbesondere für den Bereich der Lagerung und des Transportes sind allerdings alternative Löschmittel notwendig (vgl. AP Transport) zur Substitution des Löschmittels Halon im Bereich der Luftfracht.

6.6.6 Gefährdung durch Elektrizität

Die Gefährdung durch hohe Spannungen und Ströme stellt sich als unkritisch dar, da davon ausgegangen werden kann, dass das Batteriepack in einem Schadensfall weitest gehenden intakt bleibt und somit die äußere Umhüllung und die Isolationsüberwachung funktionsfähig sind. Die Elektrizität stellt in diesem Fall keine unmittelbare Gefahr für die Einsatzkräfte dar. Im Falle eines thermischen Durchgehens der Batterie wird die Brandbekämpfung in der Regel mit genügend Sicherheitsabstand durchgeführt. Der geforderte Sicherheitsabstand um einen elektrischen Schlag bei der Brandbekämpfung mit zugelassenen Feuerlöschern und Strahlrohren in elektrischen Anlagen unter 1000 V beträgt einen Meter, wodurch sich auch hier keine unmittelbare Gefährdung ergibt.

6.6.7 Explosion

Durch die schnelle und unkontrollierte Freisetzung thermischer Energie kann es zu Stichflammen und Wurfstücken mit hoher kinetischer Energie auf begrenztem Raum kommen. Die unmittelbare Gefährdung ergibt sich durch die schnelle Brandausbreitung (Stichflammen) und die Möglichkeit umherfliegender Teile. Eine Gefährdung durch eine Detonation ist bei Lithium-Ionen-Batterien nicht gegeben.

6.6.8 Fahrzeuge in einem geschlossenen Raum

Es ist notwendig mögliche Einflüsse durch die besonderen Anforderungen der Elektromobilität – in Falle dieser Studie bezogen auf die Traktionsbatterie – auf die Sicherheitsstandards für Umgebungen, in denen Elektrofahrzeuge betrieben werden (z. B. Fähren, Parkhäuser, Tunnel), zu untersuchen, zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Für diese jeweiligen Umgebungen gelten jeweils eigene Rechts- bzw. Normensysteme.

So wurde z. B. im Jahre 2013 im Rahmen einer vom BMVI beauftragten Studie (Germanischer Lloyd, Abteilung CL-R-RT, 2013) der aktuelle Brandschutz bei der Beförderung von Elektro- bzw. Brennstoffzellenfahrzeugen in so genannten RoRo- und RoPax-Schiffen untersucht. Es wurden in diesem Rahmen Handlungsempfehlungen beschrieben und entsprechende Verbesserungsmaßnahmen vorgeschlagen, die die Anforderungen an die Sicherheit der Schiffe resultierend aus den Besonderheiten der Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie berücksichtigen. Sicherheitsstandards für Schiffe sind über die sog. „International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)“ geregelt.

Für die weiteren Umgebungen, in denen Elektrofahrzeuge betrieben werden, gelten folgende Rechtskreise: Für Parkhäuser gelten Sicherheitsstandards aus dem Baurecht (die sog. Garagenverordnung). Für Tunnel gelten Vorgaben aus der EG-Tunnelrichtlinie (2004/54/EG) und die „Richtlinien für die Ausstattung und den Bereich von Straßentunneln (RABT)“.

6.6.9 Behandlung der Batterie nach einem Unfall

Ein besonderes Risiko kann von der Antriebsbatterie nach einem Unfall ausgehen. Aufgrund der mechanischen Lasten, die während eines Unfalls auf den Speicher wirken können, ist es nicht auszuschließen, dass es auch einige Zeit nach dem Unfall zu einem Ereignis in der Batterie kommen kann. Für die Einsatzkräfte vor Ort ist die Einschätzung inwiefern sich die Batterie in einem sicheren Zustand befindet momentan nur sehr eingeschränkt möglich. Ein einfacher Identifikationsmechanismus über den Zustand der Batterie ist heute noch nicht vorgesehen. Diese Information ist ebenfalls für Abschleppdienste von Bedeutung, da es im schlimmsten Fall zu einem Brand der Batterie auf dem Abschleppfahrzeug kommen kann. Das Warten auf einen Experten des Automobilherstellers, der eine Aussage über den Zustand der Batterie geben kann, ist bei der momentanen Anzahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland noch realisierbar. Bei einer signifikanten Erhöhung der Zahl an Elektrofahrzeugen wird dies in der Fläche aber nicht mehr möglich sein, auch in Hinblick einer zügigen Räumung einer Unfallstelle.

Generell sollten Elektrofahrzeuge nach einem schweren Unfall bis zur Ermittlung des Batteriezustands nicht ohne Berücksichtigung der Möglichkeit einer nachträglichen Entzündung und eines Brandes der Batterie bzw. des Fahrzeuges abgestellt werden, um gegebenenfalls das Risiko von Folgeschäden zu reduzieren (siehe Handlungsempfehlung 7.4.1).

6.6.10 Rettungsleitfäden für Elektrofahrzeuge bzw. Rettungsdatenblatt

Es existieren bereits Rettungsleitfäden für die zugelassenen Elektrofahrzeuge in Deutschland. Diese werden von den Fahrzeugherstellern frei zur Verfügung gestellt. Problematisch wird hier

gesehen, dass diese Rettungsleitfäden, ob elektronisch oder in Papierform, einer ständigen Aktualisierung bedürfen. Auch ist das Mitführen dieser Unterlagen in der Fläche der deutschen Feuerwehren nicht üblich. Wichtige Informationen zur sicheren und schnellen technischen Rettung von Insassen und Sicherheitshinweise zur Hochvoltbatterie sind in den sogenannten Rettungsdatenblättern enthalten. Die Rettungsdatenblätter werden von den OEM's über das System SilverDAT-FRS bereitgestellt. Probleme ergeben sich hier in der Bereitstellung entsprechender Tablets / Laptops für die Rettungskräfte zum Abruf der Rettungsdatenblätter beim Einsatz (siehe auch 6.4.2).

6.6.11 Schulung der Rettungskräfte

Von den Fahrzeugherstellern, dem VDA, Forschungsinstituten und teilweise in den Rettungsorganisationen selbst existieren bereits Unterlagen, Handlungsanweisungen und Schulungsprogramme zum Einsatz an Elektrofahrzeugen. Diese sind aber in der Fläche noch nicht verbreitet und häufig auch nicht abgestimmt. Bei einer Erhöhung der Anzahl an Elektrofahrzeugen muss der Schulungs- und Ausbildungsaufwand erweitert und erhöht werden.

6.6.12 Zusammenfassung

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen in der Technologie des elektrifizierten Fahrens keine grundsätzlichen Risiken gesehen werden, die eine Schadensbekämpfung bzw. Rettung an Elektrofahrzeugen grundsätzlich erschweren oder gar verhindern würden. Es können hier Risiken auftreten, die an konventionellen Verbrennungsmotor-Fahrzeugen nicht aufgetreten sind wie hohe Spannungen, mögliche Nachreaktionen des Speichers nach einem Unfall oder chemische Gefahren. Durch Schulung der Einsatzkräfte und Sensibilisierung auf die Besonderheiten batteriebetriebener Fahrzeuge und der Funktionsweise von Sicherheitseinrichtungen im Falle eines Unfalls, ist es für die Einsatzkräfte möglich, Einsätze an elektrisch betriebenen Fahrzeugen sicher zu bewältigen.

6.7 Dokumentation

Ziel des Arbeitspaketes war die Dokumentation zum Thema Batteriesicherheit innerhalb der Studie zu ermöglichen. Sie beinhaltet die Erstellung und Aufbau einer Literaturdatenbank, die möglichst alle zugänglichen relevanten Gesetze, Standards und Studien zum Thema Batteriesicherheit erfassen soll. Sie wird eine Sammlung der zurzeit anerkannten internationalen Sicherheitsstandards (ISO, IEC, SAE, BATSO, UL, ECE R100-02 etc.) enthalten, sowie nationale Richtlinien (u.a. von BAM, BMVI, ADR) und sicherheitsrelevante Studien oder Veröffentlichungen zur Verfügung stellen. Um bei diesem Vorhaben eine möglichst breite Datenbasis zu erlangen, wurde ein breites Expertengremium einbezogen, die zu ihren Erfahrungen mit den jeweiligen Vorschriften interviewet wurden. Zusätzlich wurde Kontakt mit relevanten F&E-Instituten und OEMs aufgenommen, um möglichst viele Informationen zu erfassen.

Innerhalb der Studie wurden die der Bewertungsmatrix zugrunde liegenden Dokumente separat aufgelistet. Dabei wurden zu jedem Dokument eine kurze inhaltliche Beschreibung

aller Normen und Vorschriften erstellt. Damit besteht die Möglichkeit, sich bei verwendeten Bezeichnungen schnell zu orientieren.

Technisch ist die Datenbank auf Microsoft Access aufgebaut, eine Softwareoberfläche die generell industriell weit verbreitet ist und damit keine zusätzlichen Installationen vor Ort erfordert.

Derzeit ist die Struktur thematisch in fünf Hauptgruppen unterteilt:

1. Normen
2. Regulierungen
3. Berichte
4. Präsentationen
5. Fachliteratur

Alle vorhandenen Einträge werden gesichtet, geprüft und anschließend zusätzlich mit Attributen versehen. Diese unterteilen sich in drei Hauptgruppen (elektrische-, mechanische- und Umwelttests) mit dazugehörigen Untergruppen. Als Untergruppen wurden die englischen Bezeichnungen bewusst beibehalten, da ein Großteil der Einträge in englischer Sprache vorliegt und die Bezeichnungen allgemein benutzt werden:

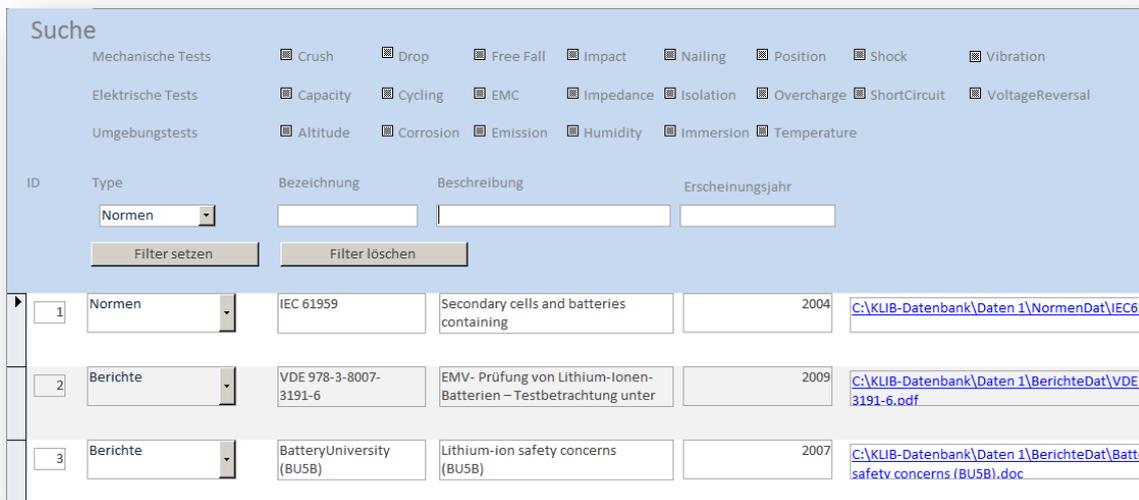
- Mechanische Tests:
Crush, Drop, Free Fall, Impact, Nail penetration, Position (Roll over), Shock, Vibration
- Elektrische Tests:
Capacity, Cycling, EMC, Impedance, Isolation, Over Charge, Over Discharge, Short Circuit, Voltage Reversal
- Umwelt-Tests:
Altitude, Corrosion, Emission, Humidity, Immersion, Temperature

Alle Einträge sind nach

- Type
- Bezeichnung
- Beschreibung
- Erscheinungsjahr

katalogisiert und in der dazugehörigen Suchmaske besteht die Möglichkeit in der Beschreibung eine Volltextsuche nach Stichwörtern durchzuführen. Sie lehnt sich damit in ihrer Erscheinungsform an bekannte Strukturen existierender Datenbanken an und ist selbsterklärend. Somit ist eine einfache Suche innerhalb des Scopes nach Schlüsselbegriffen möglich. Als zusätzliches Element wurde eine technische Auswahl aller Untergruppen auf dem Userinterface implementiert, sodass eine einfache Auswahl nach inhaltlichen Themen selbst

dann noch möglich ist, wenn die Schlüsselwörter nicht bekannt sein sollten.



ID	Type	Bezeichnung	Beschreibung	Erscheinungsjahr	
1	Normen	IEC 61959	Secondary cells and batteries containing	2004	C:\KLIB-Datenbank\Daten 1\NormenDat\IEC61959.pdf
2	Berichte	VDE 978-3-8007-3191-6	EMV- Prüfung von Lithium-Ionen-Batterien – Testbetrachtung unter	2009	C:\KLIB-Datenbank\Daten 1\BerichteDat\VDE 978-3-8007-3191-6.pdf
3	Berichte	BatteryUniversity (BU5B)	Lithium-ion safety concerns (BU5B)	2007	C:\KLIB-Datenbank\Daten 1\BerichteDat\BatteryUniversity (BU5B).doc

Abbildung 12: Datenbankmaske

Zurzeit befinden sich mehr als 200 Einträge in der Datenbank. Aus urheberrechtlichen Gründen wurden für die nicht öffentlichen Einträge die Inhaltsverzeichnisse und Zusammenfassungen hinterlegt. Die Struktur der Datenbank ist so ausgelegt, dass die Anzahl der Haupt- und Untergruppen beliebig erweiterbar ist und gegebenenfalls im Laufe des Projekts den Anforderungen angepasst werden kann. Zusätzlich enthält das Modul eine Eingabemaske, in der der Anwender eigene Einträge nach dem lokalen Download hinterlegen und somit die Datenbank nach eigenen Wünschen erweitern kann.

Zusätzlich zur Datenbank gibt es eine Zusammenstellung der Normen, Regulierungen und Vorschriften als Text-Ausführung im Anhang dieser Studie, die einen schnellen Überblick über die vorhandenen Dokumente ermöglicht.

Ein Auszug aus der Datenbank (Liste relevanter Dokumente) ist im Anhang 9.4 dargestellt.

6.8 Internationale Zusammenarbeit

6.8.1 Hintergrund und allgemeine Aufgabenstellung

Die vorliegende Studie ist auf das Wirtschaftsgebiet Deutschland konzentriert. Da die Elektromobilität aber sowohl in der Herstellung als auch in der Anwendung und Entsorgung von Fahrzeugen und Batterien global ist, wurde die Studie mit anderen Ländern diskutiert.

In diesem Projekt insgesamt und insbesondere bei „Internationale Zusammenarbeit“ wurden notwendige batteriesicherheitsrelevante Gemeinsamkeiten erkannt, Lösungen zur internationalen Abstimmung vorgeschlagen und dabei die Erfahrungen der anderen Länder genutzt.

Voraussetzungen dafür waren die Kenntnisse der sicherheitsrelevanten Regularien im internationalen Rahmen und auf der jeweiligen nationalen Ebene der weltweit wichtigsten

Automärkte: China, EU, Japan und USA. Süd-Korea wurde auf Empfehlung des Projektbeirats (Sitzung am 27.01.2015) aufgrund eines fehlenden kompakten Batterie-Elektromobilitätsprogramms - zumindest vorläufig - nicht in die Untersuchungen einbezogen. Zusätzlich zum ursprünglichen Plan wurde das Implementing Agreement for co-operation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes (IA-HEV) der IEA kontaktiert.

Bei Bedarf können über das vorliegende Projekt auch andere Länder bzw. relevante internationale Organisationen informiert werden.

Konkret erfolgte:

- A. Allgemeiner Informationsaustausch zum deutschen Projekt „Batteriesicherheit“ und zum Stand der Batteriesicherheit in den jeweiligen Ländern auf Ebene der jeweiligen Ministerien bzw. ihrer nachgeordneten Einrichtungen.
- B. Detaillierter Informationsaustausch zu inhaltlichen Fragen des deutschen Projekts mit Instituten, die in sicherheitsrelevante Projekte eingebunden sind.

6.8.2 Allgemeiner Informationsaustausch

China - CATARC

China Automotive Technology & Research Center (CATARC) ist die technische staatliche Administration für die Automobilindustrie. CATARC unterstützt die Ministerien z.B. bei Standards, Produktzertifikationen und betreibt einen Informationsservice sowie Technologie-F&E.

Kontakt wurde aufgenommen und das Projekt vorgestellt.

Die Kurzfassung des Endberichts wird übermittelt. Darauf aufbauend wird CATARC die Matrix der vorliegenden Studie mit chinesischen Sicherheitsvorschriften ergänzen.

Im Rahmen eines zwischen MOST/CATARC und BMVI/NOW zu bildenden virtuellen Elektromobilitätzentrum werden Batteriesicherheitsfragen gemeinsam bearbeitet werden.

EU - Directorate General for Research and Innovation, European Commission

Das deutsche Projekt wurde vorgestellt. Die EU wies auf eine Reihe von EU Projekten zur Batteriesicherheit hin. Die relevanten Projektleiter wurden zum internationalen Projektworkshop nach Ulm eingeladen.

Eine Kurzfassung des Endberichts wird der EU-Kommission übermittelt, auf dessen Basis die Kommission eventuell notwendige europäische sicherheitsrelevante Vorschriften initiieren will.

Japan - Japan Automobile Research Institute (JARI)

JARI ist ein neutrales Bindeglied zwischen der japanischen Regierung und der Automobilindustrie. JARI ist für Standards, Test von neuen Produkten und auch F&E verantwortlich.

Die Kurzfassung des Endberichts wird übermittelt. Darauf aufbauend wird JARI die Matrix der vorliegenden Studie mit japanischen Sicherheitsvorschriften ergänzen.

Im Rahmen eines zwischen MOST/CATARC und BMVI/NOW zu bildenden virtuellen Elektromobilitätszentrum werden Batteriesicherheitsfragen gemeinsam bearbeitet werden.

USA – DoE, DoT

Das deutsche Projekt wurde vorgestellt und diskutiert. Besonderen Raum nahm die Diskussion zur Frage *“What to do with cell/battery after reaching End of Life?”* ein, was auch in USA ein größeres Problem darstellt.

Die Kurzfassung des Endberichts wird übermittelt. Darauf aufbauend wird das DoT Infos über US Sicherheitsvorschriften übermitteln und damit die Matrix ergänzen.

International Energy Agency (IEA)

Die IEA ist eine autonome zwischenstaatliche Organisation, die im Rahmen der OECD 1974 gegründet wurde. Sie konzentriert sich auf die Erarbeitung von Informationen zum Energiesektor und des Ölmarkts. Die IEA bearbeitet verschiedene Energiebereiche, z.B. auch die Elektromobilität im Rahmen eines *Implementing Agreement for co-operation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes (IA-HEV)* in Kooperation mit 18 Ländern. Im Task 10 „Electrochemical Systems“ beschäftigt man sich u.a. mit Safety and abuse testing of batteries, recycling of lithium-ion batteries und Batteries under extreme temperature conditions.

Die deutschen Vertreter im **IA-HEV Task** haben im **Herbstmeeting 2015 der IA-HEV** das **deutsche Projekt vorläufig vorgestellt**. Die Kurzfassung des Endberichts wird der IEA übermittelt.

6.8.3 Detaillierter Informationsaustausch zu inhaltlichen Fragen

Detaillierte Informationen wurden mit EU-Partnern auf einem Batteriesicherheitsworkshop am 26.03.2015 in Ulm ausgetauscht.

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Verneuil-en-Halatte (France)

INERIS ist ein nationales Institut, das sich generell mit Sicherheitsfragen beschäftigt.

In der von INERIS im Juni 2011 vorgestellten Studie (INERIS, 2011) Konzept zur Behandlung spezifischer Risiken in der EV-Industrie - Vorläufige Risikoanalyse wurden 51 Ereignisse identifiziert, davon 11 als besonders kritisch.

Über die Arbeit von INERIS wurde auf dem Internationalen Batteriesicherheitsworkshop (26.03.2015 in Ulm) ein Überblick gegeben (Michel Demissy, INERIS, 2015).

EU Joint Research Institute, Institute for Energy and Transport (JRC-IET), Petten (Netherlands)

Das JRC ist für die European Commission ein In-House Science Service Center und ist Teil des Institute for Energy and Transport (IET). Zusammen mit dem US DoE werden gemeinsame interoperability centers for technology harmonization, product innovation, and establishment global standards for electric mobility betrieben.

Über die Arbeit vom JRC wurde auf dem Internationalen Batteriesicherheitsworkshop (26.03.2015 in Ulm) ein Überblick gegeben (Andreas Pfrang, IRC, 2015).

Flemish Institute for Technological Research NV (VITO), Mol (Belgien)

VITO ist ein F&E Institut für die Entwicklung von Produkten und Prozessen im Bereich von Energie, Umwelt und Materialien.

VITO leitete das EU-Projekt „Safety Testing Approaches for Large Lithium-Ion Battery Systems“ (STALLION), das sich mit Sicherheitsuntersuchungen für große stationäre Batterien beschäftigt. Für das deutsche Projekt interessant sind die Definitionen der einzelnen Risikostufen.

Über die Arbeiten im Projekt STALLION wurde auf dem Internationalen Batteriesicherheitsworkshop (26.03.2015 in Ulm) ein Überblick gegeben (Bart Mantels, vito, 2015).

European Virtual Institute for Integrated Risk Management (EU-VRi), Stuttgart (Germany)

Das EU-VRi ist ein europäisches virtuelles Institut für Integriertes Risikomanagement mit Service, Beratung, Information und Bildung in Bereichen des Emerging Risks.

Das EU-VRi leitete das Projekt „STationary Batteries Li-ion safe Deployment“ STABALID. STABALID widmet sich dem risk assessment und der risk identification sowie Fragen des Environmental regulatory and normative framework. Im Rahmen dieses Projekts wurden auch erste Untersuchungen zum Einfluss der Alterung auf die Sicherheit von Batterien durchgeführt.

Über die Arbeiten im Projekt STABALID wurde auf dem Internationalen Batteriesicherheitsworkshop (26.03.2015 in Ulm) ein Überblick gegeben (Bastien Caillard, EU-VRi, 2015) und (Johannes Rößner, TÜV Süd Battery Testing GmbH, 2015).

Forsvarets Forskningsinstitutt (FFI), Kjeller (Norway)

FFI ist ein F&E Institut des norwegischen Militärs.

Das FFI ist in dem NATO-Projekt AVT227 – „Balancing energy storage and safety in large format battery packs“ mit Deutschland, USA und Kanada beteiligt und darüber hinaus an dem norwegischen Projekt „Life and safety for Li-ion batteries in Maritime conditions“ (SafeLiLife), in dem untersucht werden: (i) battery safety and failure monitoring, (ii) Li-ion battery aging mechanism with safety relevance.

Über die FFI Arbeiten wurde auf dem Internationalen Batteriesicherheitsworkshop (26.03.2015 in Ulm) ein Überblick gegeben (Sissel Forseth, FFI, 2015).

6.8.4 Weitere Arbeiten

Mit dem deutschen Abschlussbericht wird auch eine englischsprachige Kurzfassung entstehen, die den internationalen Partnern übermittelt wird. Auf dieser Basis werden die Partner nationale Sicherheitsvorschriften zuarbeiten, die je nach Inhalt in die Matrix Eingang finden werden. D.h. es wird in 2016 eine Matrix-Ergänzung mit verschiedenen nationalen Sicherheitsvorschriften geben, die durch die KLiB AG „Batteriesicherheit“ erarbeitet werden soll.

6.8.5 Zusammenfassung

Die Elektro-Mobilität ist sowohl in der Herstellung als auch in der Anwendung sowie in der Entsorgung der Batterien global, was auch für die Vorschriften und Regularien gilt. In verschiedenen sicherheitsrelevanten Batteriebereichen, wie z.B. Sicherheitstests und Zulassungen gibt es bereits internationale Normen. Dies sollte mittelfristig auch in anderen Bereichen erfolgen. Um dies zu initiieren, wurden China, Japan, USA, EU und die IEA kontaktiert. Eine englischsprachige Kurzfassung des Abschlussberichts wird den internationalen Partnern übergeben. Es ist vorgesehen, dass die internationalen Partner ihre nationalen Sicherheitsvorschriften in der Matrix ergänzen.

Es wurde Kontakt zu europäischen Institutionen (INERIS-F, JRC-NL, VITO-B, EU-VRi-D, und FFI-NO) aufgenommen, die sich mit sicherheitsrelevanten Batteriefragen beschäftigt haben, um Erfahrungen, u.a. auf einem internationalen Batteriesicherheitsworkshop am 26.03.2015 in Ulm auszutauschen.

6.9 Zusammenfassung der Sicherheitsbetrachtung

Ziel dieser Studie war die Identifizierung von Risiken über die gesamte Lebensphase einer Lithium-Ionen-Batterie. Die Analyse und Bewertung dieser Risiken erfolgte innerhalb einer einheitlichen Bewertungsmatrix. Es wurden insgesamt 42 Punkte identifiziert. Die folgenden Diagramme zeigen das Ergebnis der Bewertungsmatrix (siehe Anhang).

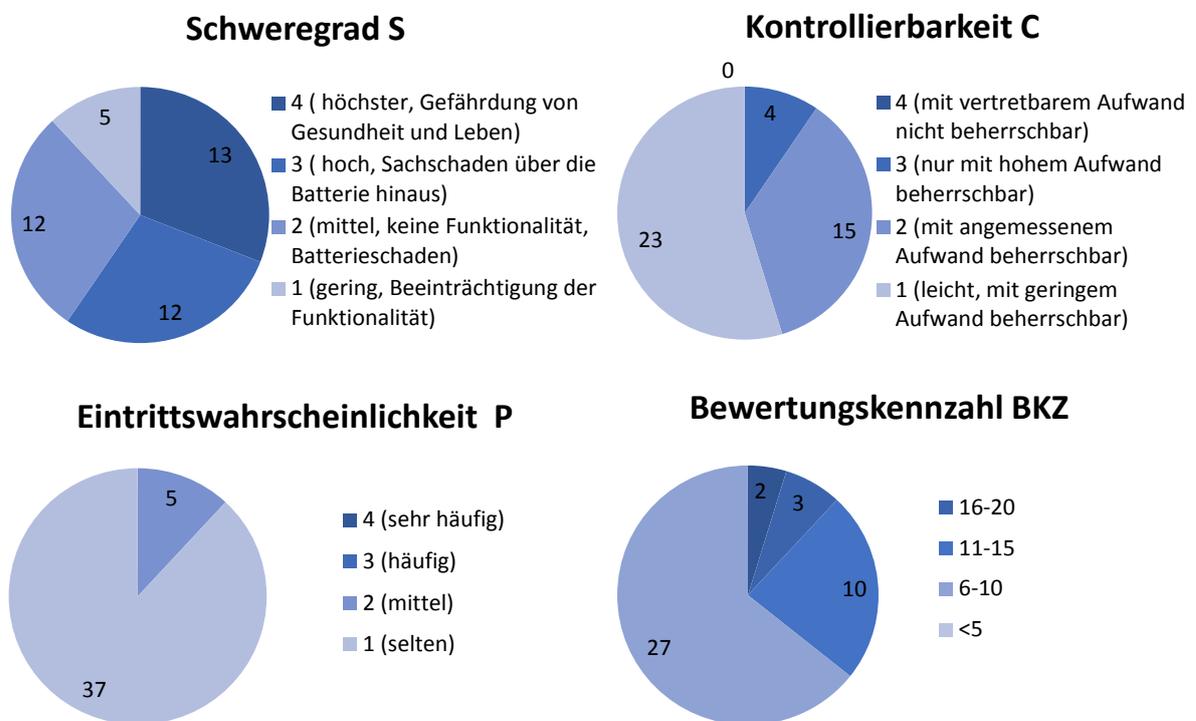


Abbildung 13: Bewertungskennzahl der betrachteten Einzelrisiken

Die Bewertungskennzahl BKZ ergibt sich aus dem Produkt der Faktoren Schweregrad S, Eintrittswahrscheinlichkeit P und Kontrollierbarkeit C:

$$BKZ = S \cdot P \cdot C$$

Entsprechend kann die Bewertungskennzahl zwischen BKZ = 1 (geringste Bewertung) und BKZ = 64 (hohe Bewertung) liegen.

Bedingt durch die Speicherung von Energie ergibt sich prinzipiell ein Gefährdungspotential durch Hochspannung und unbeabsichtigte Energiefreisetzung. Entsprechend wurden 25 (oder 59%) der bewerteten Punkte mit einem hohen ($S = 3$) bzw. höchsten ($S = 4$) Schweregrad bewertet. Bedingt durch entsprechende technische Maßnahmen wurden alle Punkte mit Eintrittswahrscheinlichkeiten selten ($P = 1$) bis mittel ($P = 2$) bewertet. 38 (oder 81%) und damit ein Großteil der bewerteten Punkte besitzen eine sehr gute ($C = 1$) bzw. gute ($C = 2$) technische Kontrollierbarkeit.

Bezüglich der technischen Kontrollierbarkeit lassen sich die meisten in der Bewertungsmatrix adressierten Punkte im Batteriesystem mit geringem ($C = 1$) bzw. angemessenem Aufwand ($C = 2$) beherrschen. Lediglich vier Punkte wurden mit $C = 3$ (nur mit hohem Aufwand beherrschbar) bewertet. Bei zwei dieser vier Punkte liegt trotz hohem Schweregrad ($S = 4$), jedoch aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit ($P = 1$) die Bewertungskennzahl bei lediglich BKZ = 12.

Die Bewertungskennzahl ist für 36 (oder 88%) der bewerteten Punkte kleiner oder gleich 10 (maximal möglich wäre BKZ = 64). Lediglich fünf Punkte (oder 9%) wurden mit einer höheren Bewertungskennzahl über 10 bewertet (siehe Abbildung 13Abbildung 13).

Diese fünf am höchsten bewerteten Punkte sind:

- Unfälle im Cargo-Lufttransport durch beschädigte/defekte Batterien (AP 1.3, #28 in der Bewertungsmatrix):
 $S = 4 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 16
- Schnelle und eindeutige Identifizierung von EV durch Rettungsdienste (AP 1.4, #36):
 $S = 4 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 16
- Batteriebrand in Folge eines Fahrzeugbrandes durch externes Feuer (AP 1.2/1.4, #15):
 $S = 4 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 12
- Unzulässige oder missbräuchliche Modifikation einer Batterie durch nicht autorisierte Person(en) (AP 1.2/1.4, #24):
 $S = 4 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 12
- Unfälle in Transport/Lagerung allgemein und in sensiblen Bereichen durch beschädigte/defekte Batterien (AP 1.3, #26):
 $S = 3 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 12

Im AP 1.3 „Transport“ sind vier Risiken zu Unfällen, Bränden und zu defekten oder beschädigten Batterien aufgenommen worden, zwei Punkte insbesondere zum Flugverkehr. Eben diese beiden Punkte #28 und #26 sind auch Bestandteil der fünf am kritischsten bewerteten Punkte. Die Zahlen beförderter Lithium-Ionen-Batterien, deren Energiegehalt

permanent wächst, steigen auf allen Verkehrsträgern weiter an (2015 wurden etwa 6 Mrd. Lithium-Ionen-Batterien befördert vgl. (Christophe Pillot, Avicenne Energy, 2015). Noch ist die Hauptanwendung dieser Zellen die Konsumerelektronik. Mit dem erwarteten starken Anwachsen der Elektromobilität in den nächsten Jahren und dem teilweise geographischem Ungleichgewicht zwischen der Produktion von Zellen (vorwiegend Asien) und der von Batterien/E-Fahrzeugen (auch stark in Europa) wird auch der Transport von Zellen für EVs, in der Regel mit wesentlich höherem Energieinhalt, stark anwachsen. Die vorliegenden Regeln für den Luftverkehr sollten daher unter dem Gesichtspunkt steigenden Logistikbedarfs und Sicherheit weiterhin überprüft werden.

Das Risiko möglicher Unfällen wird vor allem in sensiblen Infrastrukturen (Tunneln, Lagerwirtschaft, Logistikzentren etc.) teilweise auch mit Lithium-Ionen-Batterien „solo“ (>12 kg) gesehen.

Für AP 1.4 „Nutzung“ wurden insgesamt 15 Einzelrisiken von Lithium-Ionen-Batterien in Pkw identifiziert, für einige dieser Themen gibt es große Überschneidungen mit „Batterie und Batterie im Fahrzeug“ (AP 1.2) sowie „Schadensbekämpfung“ (AP 2). Dadurch, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit - abgesehen von einem Einzelrisiko – mit „selten“ ($P = 1$) und die Kontrollierbarkeit für einen Großteil der betrachteten Risiken bei mit „mit geringem Aufwand beherrschbar“ ($C = 1$) bzw. „mit angemessenem Aufwand beherrschbar“ ($C = 2$) bewertet wird, ergeben sich für 14 der 15 betrachteten Einzelrisiken relativ niedrige Bewertungskennzahlen von $BKZ \leq 12$. Lediglich ein Risiko wurde mit einer Bewertungskennzahl $BKZ > 12$ bewertet und ist in der Liste der fünf am kritischsten bewerteten Punkte gelistet: Die schnelle und eindeutige Identifizierung von EV durch Rettungsdienste.

Aus der gemeinsamen Betrachtung von AP 1.2 „Batterie und Batterie im Fahrzeug“ und AP 1.4 „Nutzung“ gehen zwei Punkte hervor, die in der Liste der fünf am höchsten bewerteten Punkte enthalten sind. Das ist zum einen der Batteriebrand in Folge eines Fahrzeugbrandes durch externes Feuer (#15) und zum anderen die unzulässige oder missbräuchliche Modifikation einer Batterie durch nicht autorisierte Person(en) (#24). Beide Punkte wurden zwar in der Eintrittswahrscheinlichkeit mit selten ($P = 1$) bewertet, heben sich aber durch den hohen Schweregrad ($S = 4$) und die nur mit hohem Aufwand beherrschbare technische Kontrollierbarkeit ($C = 3$) hervor.

Im AP 1.5 „Verwertung“ wurden drei Risiken aufgenommen, wobei durch die ggf. „internen“ Prozessketten die Risiken sich stark minimieren. Als Risiko wird aber für die Zweitverwertung (second use), die nicht durch den Hersteller autorisierte Nutzung einer Batterie oder Subkomponente in einer Verwendung als Industrie- oder Gerätebatterie gesehen. Hier spielen Risiken eine Rolle, die die Sicherheitsgrundlagen direkt betreffen, etwa den Status des geprüften Typs.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Risikopotential von Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien gering einzustufen ist.

7 Handlungsempfehlungen

Die vorliegenden Handlungsempfehlungen sind auf Basis der Untersuchungen zu Risiken im gesamten Lebenszyklus der Batterie entstanden. Für die Felder, in denen bisher vorhandene Vorschriften nicht ausreichen, um das Sicherheitsrisiko zu beherrschen, wurden in der Bewertungsmatrix in den Spalten „*Noch notwendige Maßnahmen zur Beherrschung der Risiken*“ und „*Empfehlungen für Phase II*“ Kurzhinweise gegeben, die in den folgenden Handlungsempfehlungen konkretisiert werden.

7.1 Handlungsempfehlungen „Material und Zelle“

7.1.1 Materialauswahl

Die von den Zellen ausgehende Entzündbarkeit/Brandlast beruht auf der prinzipiellen Entflammbarkeit des Elektrolyten. Diese Brandlast ist höher als der elektrische Energieinhalt der Zelle. Dies sind von den sechs am höchsten bewerteten Risiken die Punkte #3 (Kontamination von Zellmaterialien oder Komponenten, $S = 3 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 9), #15 (Einfluss externes Feuer, $S = 4 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 12) und #36 (Identifizierung von Elektrofahrzeugen nach einem Unfall, $S = 4 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 16) in der Bewertungsmatrix. Aber auch einige andere, niedriger eingestufte Gefährdungen werden durch Entflammbarkeit und Brennbarkeit des Elektrolyten beeinflusst.

Empfehlung

F&E-Projekte für die Entwicklung flammreduzierter bzw. nichtbrennbarer Elektrolyte (z.B. solid electrolytes, ionic liquids). Hierbei gilt es zu beachten, dass der Elektrolyt die meisten Zelleigenschaften wie Energie-, Leistungsdichte, Temperaturabhängigkeit und Lebensdauer entscheidend mitbestimmt. Leider wird der derzeit der Eindruck erweckt, dass höhere Energie- und Leistungsdichte eine höhere Priorität bei der Entwicklung neuer Materialien haben als die Entwicklung flammreduzierter bzw. nichtbrennbarer Elektrolyte.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMBF

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Chemieindustrie, F&E Institute

Nutzer der Lösungen: Industrie (Chemie, Zellhersteller)

7.1.2 Zusammenhängende zwischen Sicherheit und Alterung

Vor dem Verbau von Zellen in Automobil-Anwendungen wird deren Sicherheit nach verschiedenen Standards getestet. Während der Nutzung der Zellen kommt es jedoch zu internen Veränderungen, die die elektrischen Daten und vor allem auch die Sicherheit verändern können, siehe #1 (Zelldesign, $S = 3 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 4) und #17 (Sicherheit in Bezug auf Alterung von Zelle und Batterie, $S = 2 / P = 1 / C = 2$, BKZ = 4) in der Bewertungsmatrix. Diese Änderungen nach längerem Betrieb der Zelle sind darüber hinaus für die Second Use- und Oldtimer-Thematik (siehe 6.4 sowie Punkt #40 (Oldtimerthematik, $S = 2 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 8) in der Bewertungsmatrix von Wichtigkeit.

Der genaue Zusammenhang zwischen Alterung und Sicherheit ist nur unvollständig bekannt und in der Literatur zum Teil diametral beschrieben. Kenntnisse dazu sind aber essentiell, um

bei der Weiterentwicklung von Zellen sicherheitsverschlechternde Alterungsmechanismen über verbesserte Materialauswahl zu reduzieren.

Empfehlung

F&E-Projekt zur Aufklärung des Zusammenhangs zwischen Alterung/Historie und Sicherheit sowie Erstellung von standardisierten anwendungsrelevanten Alterungsverfahren.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMBF

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: F&E Institute

Nutzer der Lösungen: Industrie (Zell/Batteriehersteller, OEM)

7.1.3 Qualitätssicherung in der Zellfertigung

7.1.3.1 Qualitätssicherung - Standards

Auch bei ursprünglich als sicher getesteten Zellen können in der Fertigung Fehler im Zellbau (z.B. metallische Zellkontamination, Separatorbruch etc.) zum internen Kurzschluss und in dessen Folge zu einem Thermal Runaway führen, siehe #3 (Kontamination, S = 3 / P = 1 / C = 3, BKZ = 9) in der Bewertungsmatrix.

Empfehlung

Material- und Zellhersteller haben ihre eigenen QS-Maßnahmen entwickelt, um solche Fertigungsfehler zu erkennen und zu vermeiden, die von Hersteller zu Hersteller verschieden sein werden. Mindestanforderungen sollten durch die IEC 62660 (insbesondere IEC 62660-3 Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen - Teil 3: Sicherheitsanforderungen von Zellen und Modulen sowie IEC/TR 62660-4 Candidate alternative test methods for the internal short circuit test of IEC 62660-3) festgelegt werden.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Industrie/KLIB (Material u. Zellhersteller, OEM)

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrie/KLIB (Material u. Zellhersteller, OEM)

Nutzer der Lösungen: Industrie (Material u. Zellhersteller, OEM)

7.1.3.2 Qualitätssicherung - Messmethoden

Messmethoden, um Probleme bei der Material- und Zellherstellung online ausreichend zu erkennen, wie z.B. Identifizierung metallischer Verunreinigungen in Materialien, Bestimmung latenter Kurzschlüsse bei der Formation, etc., sind noch nicht ausreichend zuverlässig, siehe #3 (Kontamination, S = 3 / P = 1 / C = 3, BKZ = 9) in der Bewertungsmatrix.

Empfehlung

F&E Projekt zur Entwicklung von Messmethoden zur Qualitätssicherung, die Ergebnisse sollen in IEC 62660 einfließen

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMBF, BMWi, BMVI

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: F&E Institute und Industrie (Zellhersteller, OEM)

Nutzer der Lösungen: Industrie (Material Zellhersteller, OEM)

7.1.4 Bewertung der Folgen interner Kurzschlüsse (bereits in Klärung)

Ein interner Kurzschluss kann nach heutigem Kenntnisstand nicht völlig ausgeschlossen werden, siehe #2 (Fehler in der Herstellung, $S = 3 / P = 1 / C = 2$, BKZ = 6) und #3 ($S = 3 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 9) in der Bewertungsmatrix. Tests sollen daher seine Auswirkungen bestimmen, um auf Zell- und Batterieebene durch ingenieurmäßige Maßnahmen den Schaden zu begrenzen. Bisher wurde dazu der sogenannte Nageltest herangezogen, der aber aufgrund einer Vielzahl von Testvariablen schwer zu reproduzieren ist und dessen Ergebnisse oft nicht mit denen von realen Kurzschlüssen übereinstimmen, vor allem kann er Kurzschlüsse aufgrund von Fertigungsfehlern nicht nachbilden.

Relevante Tests sind bereits in dem Norm-Entwurf IEC (DIN EN) 62660-3:2014-04 (Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 3: Sicherheitsanforderungen von Zellen und Modulen (IEC 21/817/CD:2013) auf Zellebene definiert.

Empfehlung

Da die Entwicklung eines relevanten Tests bereits in einer IEC-Arbeitsgruppe adressiert (IEC62660-3) ist, soll das Ergebnis dieser Bemühungen bis Anfang 2017 abgewartet werden.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Industrie (Standard-AGs)

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrie (Standard-AGs)

Nutzer der Lösungen: Industrie (Standard-AGs)

7.1.5 Früherkennung eines internen Kurzschlusses einer Zelle innerhalb einer Batterie

Es gibt bereits Untersuchungen (X. Feng et al, 2016), die zeigen, dass ein niederohmiger Kurzschluss, der ein Thermal Runaway verursachen kann, sich nicht plötzlich etabliert, sondern über längere Zeit entwickelt, siehe #2 (Fehler in der Herstellung, $S = 3 / P = 1 / C = 2$, BKZ = 6) und #3 ($S = 3 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 9) in der Bewertungsmatrix.

Empfehlung

Methoden zur Früherkennung von Kurzschlüssen, integrierbar in das BMS der Batterie, werden bereits entwickelt. Diese sollen bewertet werden, indem ihre Effizienz in Versuchen nachgewiesen wird. Hierzu ist eine Methode zur kontrollierten Herbeiführung solcher Fertigungsfehler eine notwendige Voraussetzung. Auch hier gibt es bereits zahlreiche Ansätze, die auf ihre korrekte Darstellung eines Fertigungsfehlers hin bewertet werden müssen.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMBF, BMVI

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: F&E Institute, Industrie (OEM)

Nutzer der Lösungen: Industrie (OEM)

7.2 Handlungsempfehlungen „Batterie und Batterie im EV“

Die Batterie in einem Elektrofahrzeug ist als gesamtes System mit zugehöriger Überwachung und Sicherheitssystem zu betrachten. Deshalb erfolgen die Zulassungstests auch weitgehend auf Gesamtfahrzeugprüfungen. Die Entwicklungsfortschritte für Elektrofahrzeuge der letzten

Jahre spiegeln sich auch in den Standards und den Zulassungsvorschriften wieder. Demzufolge ist auch die Definition der notwendigen Tests zur Zulassung, weitgehend basierend auf internationalen Standards abgeschlossen.

7.2.1 Fahrzeugbrand durch externe Zündquellen sowie Thermal Propagation

Zu diesem Thema siehe #15 (Vehicle fire, $S = 4 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 12) und #16 (Battery design, $S = 3 / P = 1 / C = 2$, BKZ = 6) in der Bewertungsmatrix. Diese Thematik ist bereits in der Fortschreibung der internationalen Standards identifiziert. In der Überarbeitung der ISO 12405 Teil 3 und der EVS GTR (wird mit dem offiziellen Entwurf „Final Draft“ etwa Ende 2016 erwartet) wird an international einheitlichen Tests zu externen Fahrzeugbränden und zur „Thermal Propagation“ gearbeitet.

Empfehlung

Die Empfehlung lautet hier, die Standardisierung zur Thermal Propagation in ISO 12405 Teil 3 weiter zu verfolgen und dann entsprechend umzusetzen.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Industrie (Standard-AGs), Normungsgremien

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrie (Standard-AGs)

Nutzer der Lösungen: Industrie (Standard-AGs)

7.2.2 Batteriemodifikationen

Diese Thematik ist in AP „Batterie und Batterie in EV“ (siehe 6.2) und AP „Nutzung“ (siehe 6.4) adressiert und in der Bewertungsmatrix unter Punkt #24 (Modifikation von Batterie durch nicht autorisierte Personen, $S = 4 / P = 1 / C = 3$, BKZ = 12) aufgenommen worden. Zu den angenommenen „unsachgemäßen Modifikationen und/oder Modifikationen und/oder Reparaturen durch unautorisierte Personen“ an Fahrzeugen stehen bislang nur wenige Erkenntnisse zur Verfügung. Einerseits birgt natürlich die in der Batterie anstehende Hochspannung ein lebensgefährliches Potential andererseits stellt sicherlich auch der Aufwand für eine Modifikation eine Hemmschwelle dar, die eine Grundkenntnis der Gefahrenquellen erwarten lässt. Zusätzliche Maßnahmen, die eine Demontage weiter erschweren, werden nicht angeraten, wenn dies im Widerspruch zur Servicemöglichkeit steht. Es werden daher keine weiteren Maßnahmen empfohlen, die über die derzeit angewendeten Gefahrenhinweise und Kennzeichnung der Hochspannung führenden Teile hinausgehen.

Darüber hinaus sollten die Ergebnisse von Untersuchungen, die im Bereich der technischen Überwachung (§29 StVZO) hinsichtlich von unsachgemäßen bzw. nicht erlaubten Fahrzeugmodifizierungen an Hochvoltkomponenten festgestellt wurden, bei der Weiterentwicklung der Technischen Hauptuntersuchung berücksichtigt werden, z.B. (Robert Beyer FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH Dresden, November 2013).

Diese Thematik wird mit ansteigender Zahl von Fahrzeuge und auch deren Alter zunehmen.

Empfehlungen

Es wird den technischen Überwachungseinrichtungen empfohlen, Voraussetzungen zu schaffen, dass nach einigen Jahren Erfahrung mit EVs entsprechende Auswertungen durchgeführt und gegebenenfalls umgesetzt werden können.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI/KBA/BAST

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: KBA, TÜV, DEKRA

Nutzer der Lösungen: Organisationen, die in den Lebenszyklus von Lithium-Ionen-Batterien involviert sind

7.3 Handlungsempfehlungen aus „Lagerung und Transport“

7.3.1 Transport, insbesondere Lufttransport von Lithium-Ionen-Batterien

Mit dem in den nächsten Jahren erwarteten starken Anwachsen der Elektromobilität und dem teilweise großen geographischen Ungleichgewicht zwischen der Produktion von Zellen (vorwiegend Asien) und der von Batterien/E-Fahrzeugen (stark in Europa) wird der Transport von Zellen aber auch von EV-Ersatzbatterien weltweit enorm ansteigen. Dies führt zu großen logistischen Herausforderungen insbesondere im Luftverkehr mit Batterien hoher Energien, die unter Berücksichtigung der Sicherheit bewältigt werden müssen.

Neben dem Lufttransport sind auch andere sensible Bereiche, wie z.B. Tunnel, Stadtzentren, Parkhäuser, Seefahren zu berücksichtigen. Deutschland hat z.B. ein Formal Safety Assessment zur Beförderung von Elektrofahrzeugen auf Ro/Ro-Schiffen durchführen lassen und dies bei der International Maritime Organization (IMO) adressiert.

Entsprechende Punkte werden in der Bewertungsmatrix beschrieben unter:

#25 – Unfälle in Transport/Lagerung generell und in sensible Bereichen (S = 3 / P = 1 / C = 2, BKZ = 6)

#26 – Unfälle in Transport/Lagerung generell und in sensible Bereichen durch beschädigte Batterien (S = 3 / P = 2 / C = 2, BKZ = 12)

#27 – Unfälle allgemein im Cargo-Lufttransport (S = 4 / P = 1 / C = 2, BKZ = 8)

#28 – Unfälle im Cargo-Lufttransport durch beschädigte Batterien (S = 4 / P = 2 / C = 2, BKZ = 16)

Empfehlungen

Lufttransport

Es wird entsprechend #27 und #28 empfohlen, dass sich die Organisationen der Transportunternehmen, vornehmlich des Lufttransports und der Automobilhersteller abstimmen, wie die stark anwachsenden Logistikaufgaben unter strengen Sicherheitsmaßnahmen bewältigt werden können. Diese Abstimmungen sind bereits angelaufen, das Ergebnis ist im Rahmen der Kontrolle der Handlungsempfehlungen zu evaluieren.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI//KBA/BAST

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Luftfahrtbundesamt, VDA, IMO

Nutzer der Lösungen: Industrie (OEMs, Luftfahrt, Seefahrt)

Andere sensible Bereiche

Es ist entsprechend Punkt #25 zu untersuchen, inwieweit und unter welchen Umständen eine steigende Gefährdung in sensiblen Bereichen auftritt, wie z.B. Tunnel, geschlossene Räume, Seefähren.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: F&E Institute, Industrie (OEMs)

Nutzer der Lösungen: Industrie (Klib.OEMs), Betreiber sensibler Bereiche.

7.3.2 Transport von beschädigte und/oder defekten Batterien

Wie bereits unter 6.3.1 beschrieben, stellt der Transport, vor allem der Lufttransport und insbesondere der von beschädigten Batterien ein hohes Risiko dar und ist in #26 und #28 adressiert.

Empfehlungen

Erarbeitung objektiver Kriterien zur Unterscheidung von defekten und beschädigten Batterien. Erarbeitung objektiver Kriterien zur Einschätzung des Transportrisikos, insbesondere beschädigter Batterien und darauf aufbauend von go/no-go Entscheidungen. Diese go/no-go Entscheidungen können an spezifische Verpackungsmethoden gekoppelt werden, die den Transport von beschädigten Batterien unterschiedliche Risikoklassen erlauben. Dazu sind relevante Verpackungsmethoden zu entwickeln und entsprechenden Risikoklassen zuzuordnen.

Zur Einschätzung des Transportrisikos kann auf das BMS zurückgegriffen werden, die Entwicklung neuartiger Diagnoseverfahren darüber hinaus ist aber unerlässlich, wie z.B. beschrieben unter 7.1.5 „Früherkennung eines internen Kurzschlusses“.

Die objektiven Einschätzungen zum Transportrisikos müssen allgemeingültig sein, weg von Einzelfallbetrachtungen.

Einige dieser Vorschläge sind in unterschiedlichen Gremien in Diskussion. D.h, vor der Umsetzung der hier gegebenen Empfehlungen ist der status-quo der Diskussionen zu bestimmen.

Bereits heute gibt es von den einzelnen OEMs geeignete Verpackungseinheiten, die speziell für den Transport von beschädigten und/oder defekten Batterien entwickelt worden sind. Diese sind durch die BAM für diesen Verwendungszweck zugelassen.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: VDA, BAM, F&E Institute, Industrie (OEMs), Transportunternehmen

Nutzer der Lösungen: Industrie (OEMs), Transportunternehmen

7.4 Handlungsempfehlungen „Nutzung“

7.4.1 Schnelle Identifizierung von Elektrofahrzeugen durch Rettungskräfte nach Unfall

Im Rahmen der durchgeführten Interviews und des Workshops am 21. September 2015 wurde deutlich, dass die bestehenden Maßnahmen zur Identifizierung von EVs durch Rettungskräfte ausreichend sind. Diese Maßnahmen wurden ausführlich im AP „Nutzung“ (siehe 6.4) beschrieben. Allerdings sind die verfügbaren Möglichkeiten, zum Beispiel Online-Kennzeichenabfrage und automatisierte Bereitstellung der Rettungsdatenblätter noch nicht bei allen Rettungsleitstellen/Feuerwehren eingeführt. (Siehe auch #36 in der Bewertungsmatrix: Identifizierung von Elektrofahrzeugen nach einem Unfall.)

Empfehlung

Es wird empfohlen, alle Rettungsleitstellen zu Rettungsdatenblättern und Identifizierungsmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen zu informieren. Weiterhin sollen Online-Abfragemöglichkeiten zur Identifizierung von Fahrzeugen, insbesondere zu EVs für alle Rettungsleitstellen geschaffen werden.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI, Landesministerien, Innenministerkonferenz der Länder, Verkehrsausschuss des Bundesrats

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Rettungskräfte, OEMs

Nutzer der Lösungen: Rettungsleitstellen

7.4.2 Technische Überwachung: technische Hauptuntersuchung (§29 StVZO)

Das Erkennen von technischen Mängeln und unsachgemäßen Modifizierungen (siehe auch Punkt 7.2.2) von Fahrzeugbatterien kann in Servicestationen, die durch die OEMs geschult werden müssen, und im Rahmen der regelmäßigen technischen Hauptuntersuchung (§29 StVZO) erfolgen. Seitens der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurden im November 2013 im Rahmen des Berichts „Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung“ (Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung, November 2013) Vorschläge für die Untersuchungen und Vorgaben abgeleitet. Die 47. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften berücksichtigt bereits an vielen Stellen Elektroantriebe. Daher werden nur geringe Anpassungen an in die StVZO für §19 und den dazugehörigen Beispielkatalog sowie §29 vorgeschlagen. Für die Untersuchungspunkte zum HV-System wird die Entwicklung einer Hochvolt-Richtlinie vorgeschlagen. (Siehe #38 in der Bewertungsmatrix: Maßnahmen im Bereich der technischen Hauptuntersuchung (§29 StVZO) zur Untersuchung der Batteriesicherheit.)

Empfehlungen

Berücksichtigung der Erfahrungen zu technischen Mängeln zur weiteren Qualifizierung der periodischen technischen Überwachung (§29 StVZO) (Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung, November 2013).

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI, BASt

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Organisationen der technischen Überwachung
Nutzer der Lösungen: Organisationen der technischen Überwachung

7.4.3 Einfluss von Langzeiteinlagerung auf das Sicherheitsverhalten von Batterien (Oldtimerthematik)

Zu dieser Thematik – Langzeiteinlagerungen zum Wertzuwachs aufgrund eines Oldtimerstatus – existieren ebenfalls aufgrund eines zeitlichen Versatzes nur wenige Erkenntnisse. Bekannt ist, dass das Batterieverhalten nach Langzeitlagerungen durch die Kalender-Alterung bestimmt wird.

Diese Nischenthematik ist verwandt mit der Problematik „Bestimmung der Sicherheit über die gesamte Zyklen/Kalender-Lebensdauer“ und wird daher mit unter 7.1.2 behandelt. Siehe #40, Einfluss auf die Batteriesicherheit durch Langzeiteinlagerung (mehrere Jahre, Oldtimerthematik).

Empfehlung

Hinweise in der Bedienungsanleitung zum langfristigen Einlagern von Elektrofahrzeugen

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Industrie (OEMs)

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrie (OEMs)

Nutzer der Lösungen: Industrie (OEMs)

7.5 Handlungsempfehlungen „Verwertung“

7.5.1 Second Use durch die OEMs bzw. in Zusammenarbeit mit den OEMs

Das Risiko der Zweitverwendung von Batterien aus Fahrzeugen durch die Automobilindustrie bzw. in Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie wurde niedrig bewertet (# 41, S = 2 / P = 2 / C = 1, BKZ = 4). Es wird empfohlen, die Ergebnisse aus den laufenden Projekten abzuwarten. Parallel dazu wurde bereits in 7.1.2 angeregt, den Einfluss der Alterung auf das Sicherheitsverhalten von Zellen zu untersuchen. Für die Zweitverwendung soll diese Untersuchung auf gealterte Zellen mit niedriger Restkapazität (ca. 60% der Anfangskapazität gegen Ende der Zweitnutzung) ausgeweitet werden. Ferner ist sicherzustellen, dass die Historie der Batterie im BMS in der Batterie hinterlegt ist und ausgelesen werden kann.

Es wird davon ausgegangen, dass nur komplette Batterien oder Module und keine Einzelzellen zur Zweitverwendung transportiert werden. Aus Sicherheitsgründen sollte festgelegt werden, in welchem Ladezustand sich diese befinden sollen.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMBF, BMVI, BMWi

Ansprechpartner für die Erarbeitung von Lösungen: Forschungsinstitute für Untersuchungen des Alterungseinflusses, Automobilindustrie für laufende Second Use Projekte und Auslesemöglichkeiten des BMS

Nutzer der Lösungen: EVUs, andere Betreiber von Speichern

7.5.2 Second Use durch Dritte

Eine Zweitverwendung von Batterien in Anwendungen, für die keine Erfahrungen vorliegen, oder durch Personen und Institutionen, die nicht die erforderlichen Qualifikationen haben, sollte geregelt werden. Dies gilt zum Beispiel für eine kommerzielle Nutzung von Fahrzeugbatterien oder deren Komponenten in Heimspeichern, aber auch für die Nutzung durch Einzelpersonen.

Ansprechpartner für die Umsetzung: BMVI

Ansprechpartner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrieverbände

Nutzer der Lösungen: Hersteller und Nutzer von Heimspeichern

7.5.3 Recycling

Als Risiko beim Recycling wird das Sammeln, Lagern und Transportieren von großen Zahlen von Batterien mit unterschiedlicher Historie und möglicherweise unterschiedlichem Sicherheitsverhalten gesehen (#42 – Transport und Lagerung von Batterien, die zum Recyceln bestimmt sind: $S=2 / P=2 / C = 2$, BKZ = 8). Es ist selbstverständlich, dass hierzu alle einschlägigen Vorschriften für Transport und Lagerung eingehalten werden müssen. Zusätzlich wird empfohlen, eine Klassifizierung der Gefährdung durch gealterte Batterien einzuführen. Hierzu können einerseits Erkenntnisse aus der Studie des Einflusses der Alterung auf das Sicherheitsverhalten (siehe 7.1.2.1), andererseits die Informationen aus dem BMS dienen (siehe auch oben).

Ansprechpartner für die Umsetzung: BMBF für Untersuchungen des Alterungseinflusses,

Ansprechpartner für die Erarbeitung von Lösungen: Forschungsinstitute für Alterungseinfluss,

Automobilindustrie für laufende Second Use Projekte und BMS

Nutzer der Lösungen: Sammler und Recycler von Altbatterien

7.6 Handlungsempfehlungen „Schadensbekämpfung“

7.6.1 Schnelle Identifizierung des Batteriezustands nach einem Unfall

Die schnelle Identifikation des Batteriezustandes nach einem Unfall sollte über eine einfache z.B. optische Anzeige auf Basis von im BMS gespeicherten Daten auch unter Berücksichtigung der Batteriehistorie möglich sein. Vorteilhaft hieran wäre, dass die Einsatzkräfte sehr schnell Klarheit über den momentanen Sicherheitszustand der Batterie hätten. Dies würde die Arbeit der Rettungskräfte bei allen Arten von Unfällen erleichtern (z.B. #25 – Unfälle in Transport/Lagerung in sensible Bereichen ($S = 4 / P = 1 / C = 2$, BKZ = 8), da es in der Batterie infolge mechanischer Deformationen zu Kurzschlüssen mit nachfolgendem Thermal Runaway (Feuer, Explosionen) kommen kann aber nicht muss. Neben dem Zugriff auf Daten aus dem BMS wäre eine Batteriezustandsbestimmung auch über Information und Kommunikations (IuK) Technologien z.B. über Datencloud möglich.

Bei Unfällen von EVs kann ein zügiger Abtransport verunfallter Fahrzeuge hierdurch unterstützt werden, da der Abschleppunternehmer einen Indikator hat, ob das EV sicher transportiert werden kann für den Fall, dass die Fahrzeugbatterie betroffen ist. Siehe dazu #36 (Identifizierung von Elektrofahrzeugen nach einem Unfall, $S = 4 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 16) und

#22 (Beschädigung der Batterie im Fahrzeug verursacht im Betrieb oder durch einen Unfall, $S = 4 / P = 1 / C = 1$, BKZ = 4) in der Bewertungsmatrix. Generell sollten Elektrofahrzeuge nach dem Abtransport nach einem schweren Unfall bis zur Ermittlung des Batteriezustands im Freien und mit Abstand zu anderen Gebäuden und Fahrzeugen abgestellt werden, um gegebenenfalls das Risiko von Folgeschäden zu reduzieren.

Empfehlung

Entwicklung einer einfachen standardisierten Zustandsanzeige für Batterien nach einem Unfall, zur besseren Einsatzplanung von Rettungskräften und Abschleppdiensten. Festlegung einer einheitlichen Vorschrift zum Abschleppen von verunfallten Fahrzeugen und einheitliche Regelungen zum Abstellen bis zum fachkundigen Reparieren oder Stilllegen.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Industrie (OEMs)

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrie (Batteriehersteller, OEMs), F&E Institute

Nutzer der Lösungen: OEMs, Rettungskräfte, Abschleppdienst

7.6.2 Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Für in Brand geratene (verunfallte) Elektrofahrzeuge sind generell analoge Brandbekämpfungsmaßnahmen wie bei konventionellen Fahrzeugen anzuwenden, dazu sind ausreichende Mengen Löschwasser einzusetzen. In bestimmten Situationen kann der Einsatz von größeren Mengen Löschwasser kritisch (z. B. in Tunneln) oder gar unmöglich (z. B. im Luftverkehr) sein. Dies wurde bereits in #25 und #27 adressiert (siehe 7.3.1). Für diese Fälle sind alternative Löschmittel bereit zu stellen. Dafür sind heute jedoch noch keine zufrieden stellenden Lösungen vorhanden. Anforderungen bestehen hier im schnellen Löschen und Kühlen mit kleinen Mengen Löschmittel, aber auch in der Aufnahme von Brandgasen sowie eventuell austretenden toxischen Substanzen.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI, Industrie (OEMs)

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: F&E Institute, Industrie (Batteriehersteller, OEMs), Feuerwehren

Nutzer der Lösungen: Feuerwehr und Rettungskräfte, OEMs

7.6.3 Schulung / Training

Das Vorgehen von Rettungskräften an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, insbesondere an batteriebetriebenen Fahrzeugen erfordert umfangreiche Kenntnisse über Besonderheiten und das korrekte und sichere Vorgehen im Schadensfall. Siehe #36 (Fahrzeugidentifikation, Empfehlungen im Umgang mit verunfallten konventionellen Fahrzeugen können nicht auf EV angewandt werden, $S = 4 / P = 2 / C = 2$, BKZ = 16) in der Bewertungsmatrix. Es existieren bereits gute Nachschlagewerke sowie Informationsbroschüren, allerdings finden diese meist nur auf höherer Ebene bei den Rettungsorganisationen Verbreitung.

Schulungen und Training ist jedoch nicht nur ein Schwerpunkt für Rettungskräfte. Auch in anderen Bereichen des gesamten Lebenszyklus der Lithium-Ionen-Batterien ist dies ein sehr wichtiges Thema. Aufgrund der dynamischen Entwicklung (z.B. neue Systeme, neue Anwendungen, etc.) von Lithium-Ionen-Batterien speziell auch im Sicherheitsbereich ist eine

regelmäßige Weiterbildung und auch deren Kontrolle von in den Lebenszyklus involvierten Mitarbeitern und Servicepartnern (z.B. im Transport, siehe Punkte #25-28) notwendig. Dies erfolgt bereits partiell in der Industrie, ist aber gesetzlich nicht geregelt.

Empfehlungen

Rettungskräfte

Erarbeitung von Leitfäden zum Umgang mit Fahrzeugen mit alternativen Antrieben für Rettungskräfte. Diese Leitfäden sollen in der allgemeinen Grundausbildung der Rettungskräfte aufgenommen werden, um möglichst viele Einsatzkräfte in diesem Bereich Kenntnisse über Besonderheiten und Gefahren zu vermitteln.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Landesministerien, Innenministerkonferenz der Länder

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Rettungskräfte, OEMs, F&E Institute,

Nutzer der Lösungen: Rettungskräfte, Abschleppdienst

Generelle Weiterbildungen

Es ist festzulegen, für welche Mitarbeitergruppen, die in den Lebenszyklus von Lithium-Ionen-Batterien involviert sind, Weiterbildungen und mit welchem Inhalt zu erfolgen haben.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: Industrieverbände, KLIB

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Industrie, KLIB, F&E Institute, Weiterbildungszentren

Nutzer der Lösungen: Organisationen, die in den Lebenszyklus von Lithium-Ionen-Batterien involviert sind

7.6.4 Gasemissionen und Brandverhalten

Unsicherheit gibt es bei den Einsatzkräften bezüglich der Gasemissionen aus einer Lithium-Ionen-Batterie. Insbesondere die Thematik „Freisetzung bzw. Bildung von Fluorwasserstoff und anderen Fluorphosphorverbindungen“. Hierzu wurden bereits einige wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht mit teilweise unterschiedlichen Ergebnissen. Das Thema HF-Emissionen führt bei den Einsatzkräften zu Verunsicherung bei der Auswahl der notwendigen Schutzkleidung bzw. stellt sich hier die Frage ob die Standardschutzkleidung der Feuerwehr ausreichenden Schutz bietet. Letzten Endes geht es um die Bewertung ob die Einsatzkräfte die Batterie als chemische Gefährdung einstufen müssen. Siehe zum Beispiel #15 (Fahrzeugbrand, S = 4 / P = 1 / C = 3, BKZ = 12) in der Bewertungsmatrix.

Neben den Gasemissionen spielt das Brandverhalten und die Brandlast/Intensität einer Lithium-Ionen-Batterie eine wichtige Rolle für den vorbeugenden Brandschutz, speziell in der Bewertung eines Brandereignisses in geschlossenen Räumen und der Ermittlung des Löschwasserbedarfes zum Löschen einer Lithium-Ionen-Batterie im Fahrzeug und in größeren Lagern.

Aus Diskussionen zum Beitrag der Batterien zu Rauchgasen beim Brand von Fahrzeugen, speziell zu Fluorwasserstoff (HF) und der Brand der organischen Lösungsmittel (Elektrolyt) ließ

sich erkennen, dass trotz vieler durchgeführter Tests noch Uneinigkeit unter den Experten herrscht, wie die Messmethoden und die Auswirkungen zu beurteilen sind. Im speziellen werden Antworten zum Einsatz notwendiger Schutzmaßnahmen für Rettungskräfte erwartet.

Empfehlung

Die Ergebnisse der bisher veröffentlichten Studien zu diesem Thema sollten zusammengetragen und mit den Ergebnissen zu Fahrzeugbränden herkömmlich angetriebener Fahrzeuge verglichen werden. Empfohlen wird darüber hinaus ein Verbundprojekt zur Zusammenführung, Gegenüberstellung und Bewertung der Messmethoden und Ergebnisse von international bereits existierenden HF-Messungen und Rauchgasemissionsmessungen an Zellen und Elektrofahrzeugen. Es sollten reproduzierbare, realitätsnahe Messmethoden und gegebenenfalls Empfehlungen für Rettungskräfte bei Bränden in Bezug auf Brandemissionen bei Elektrofahrzeugen und im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen erarbeitet werden.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMBF, BMVI

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: F&E Institute, Industrie (Batterie, OEMs), Feuerwehr

Nutzer der Lösungen: Rettungskräfte

7.6.5 Datenbank zum Monitoring von Schadenfällen

Zurzeit gibt es noch wenig praktische Erfahrungen zu Schadensfällen mit Lithium-Ionen-Batterien und batteriebetriebenen Fahrzeugen. Das bezieht sich sowohl auf die Ursachen der Schadensfälle als auch auf die Brandbekämpfung und die technische Rettung von Personen aus verunfallten Fahrzeugen.

Empfehlung

Einrichtung einer Datenbank, in die auf Basis eines noch zu entwickelnden Fragebogens relevante Unfalldaten und das Vorgehen/Erfahrungen bei der Schadensbekämpfung dokumentiert werden. Die Datenbank ist bei OEMs und Rettungskräften periodisch auszuwerten.

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: Rettungskräfte, Industrie (OEMs)

Nutzer der Lösungen: Rettungskräfte, Industrie (OEMs)

7.7 Handlungsempfehlungen aus AP Internationale Beziehungen

Die Studie ist zwar auf Deutschland konzentriert, der Verkehr ist aber grenzüberschreitend und auch die Exporte sind international. Ein Austausch von Erfahrungen und auch Vorschriften im Batteriesicherheitsbereich ist daher sinnvoll.

Empfehlung

Es ist eine englischsprachige Kurzfassung des Abschlussberichts zu erstellen und an CATARC (China), DoT (USA), EU-Kommission, IEA und JARI (Japan) mit der Bitte weiterzuleiten, die Matrix mit nationalen Vorschriften zu ergänzen, die dann in die Datenbank aufgenommen

wird. Es ist zu diskutieren, welche Vorschriften möglicherweise auch in Deutschland übernommen werden sollten

Ansprechpartner für die Umsetzung der Empfehlung: BMVI, BMWI, BMBF

Partner für die Erarbeitung von Lösungen: KLiB

Nutzer der Lösungen: Organisationen, die in den Lebenszyklus von Lithium-Ionen-Batterien involviert sind

7.8 Weiteres Vorgehen

Die Umsetzung der vorgeschlagenen Empfehlungen soll durch die KLiB AG Sicherheit begleitet werden. Dazu sollten die Mitglieder dieser KLiB AG die Themen des Projekts reflektieren. Wenn diese nicht durch KLiB-Mitglieder möglich ist, dann sollten auch Nicht-KLiB Mitglieder als Gäste in die KLiB AG Sicherheit integriert werden.

Das weitere Vorgehen wird im Projektbeirat im Februar 2017 diskutiert.

Da die Marktdurchdringung von Lithium-Ionen-Batterien im EV-Bereich gerade beginnt (weltweit ist die Zahl elektrisch betriebener PKW in 2015 auf ca. 1,3 Mio. gestiegen (Alexander Del Regno, ZSW Ulm, 2016)) liegen noch keine statistisch fundierten Daten aus der Elektromobilitäts-Praxis zum Thema Batteriesicherheit vor. Dazu kommt, dass der Lithium-Ionen-Batteriebereich aufgrund permanenter Weiterentwicklungen bei Materialien und Systemen hochdynamisch ist. D.h. die Einschätzungen dieser Studie sind teilweise zu ändern und zu ergänzen. Es ist zu überlegen, diese Betrachtungen auch auf den stationären Bereich, eventuell auch Konsumerbereich, auszudehnen.

Es wird daher vorgeschlagen, jährlich einen Batteriesicherheitsworkshop in Verbindung mit dem vom KLiB veranstalteten Batterieforum Deutschland durchzuführen, um den aktuellen Stand und die Umsetzung der Handlungsempfehlungen zu beleuchten. Der Workshop wird 2017 erstmalig stattfinden.

8 Zusammenfassung

Deutschland will nach dem Beschluss der Bundesregierung Leitmarkt und Leitanbieter im Bereich der Elektromobilität werden. Die Batterie stellt für Elektrofahrzeuge eine Schlüsselkomponente dar. Die Batterie als Energiespeicher bedarf besonderer Beachtung hinsichtlich ihrer Sicherheit. Diese Studie bewertet den aktuellen Stand der Zulassungsvorschriften, internationalen Standards für Serien-Elektrofahrzeuge und deren Batterien. Weiterhin werden Maßnahmen aufgezeigt, die das betrachtete Restrisiko weiter reduzieren können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Risikopotential von Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien gering einzustufen ist. Dies liegt zum einen daran, dass die Sicherheit von Batteriesystemen in der Elektromobilität in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht hat, zum anderen werden Elektrofahrzeuge nahezu ausschließlich von großen etablierten Fahrzeugherstellern angeboten. Diese Fahrzeuge sind hinsichtlich Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Qualitätsmanagement, Zertifizierung, Homologation und Service nach den identischen strengen Kriterien aufgebaut, wie Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben auch. Gleichzeitig war es wichtig, dass im Laufe der vergangenen Jahre eine Vielzahl von Gesetzen, Normen und Standards entwickelt und verabschiedet wurden, die ein einheitlich hohes Sicherheitsniveau gewährleisten. Allerdings sind noch nicht alle Normenentwicklungen und Gesetzentwicklungsinitiativen abgeschlossen.

Die Kernaussagen dieser Studie sind:

- Auf Batteriesystemebene werden alle bekannten Risiken der Zellebene berücksichtigt und abgefangen und gewährleisten einen sicheren Betrieb. Fahrzeugübergreifende Sicherheitssysteme in mehreren Schalen gewährleisten die Einhaltung der Batteriebetriebsparameter und reagieren im Fehlerfall. Dies wird auch in den entsprechenden Zulassungstests wiedergespiegelt.
- Derzeit in Europa geltende Zulassungsvorschriften testen die Sicherheit von Elektrofahrzeugen und Batteriesystemen bereits umfassend ab und gewährleisten eine Sicherheit vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen.
- Weitere Testbeschreibungen werden auf internationaler Ebene erarbeitet.
- Die höchsten identifizierten Risiken entstehen durch unsachgemäße Handhabung von defekten Batterien im Transport, potentiell bei Modifikationen am System sowie im Rahmen der Identifizierung von Elektrofahrzeugen durch Rettungskräfte nach einem Unfall.
- Die Einführung neuer Technologien erfordern generell Maßnahmen in der Ausbildung für Rettungskräfte und die Zusammenfassung von Untersuchungen sowie die statistische Beobachtung zukünftiger Vorfälle.
- Einzelne technische Themen wie Rauchgaszusammensetzung im Falle eines Fahrzeugbrandes und die Auswirkung der Betriebsdauer der Zellen auf deren Sicherheit erfordern eine weitere Zusammenführung der Expertenmeinungen.
- Öffentlich zugänglichen Informationen zur Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien sind unvollständig und lückenhaft. Eine belastbare Datengrundlage zur objektiven Bewertung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien ist auf dieser Basis nicht gegeben. Die Sicherheit liegt im allgemeinen Interesse und eine belastbare Auswertung dazu wäre wünschenswert. Die KLiB AG Batteriesicherheit soll daher die weiteren Aktivitäten rund

um die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien in Zusammenarbeit mit der NOW koordinieren.

Eine weitere allgemeine Handlungsempfehlung dieser Studie ist Einbeziehung aller anderen Anwendungen (außerhalb der hier betrachteten EVs) für Batterien in eine entsprechende Sicherheitsbetrachtung. Beispiele hierfür sind andere Verkehrsträger wie Elektrofahräder, Kleintransporter, etc., stationäre Batteriespeicher, v.a. auch Heimspeicher, sowie Konsumerzellen in sämtlichen mobilen Anwendungen (Laptop, Smartphone, Tablet, etc.).

9 Anhang

9.1 Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMS	Batteriemanagementsystem
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CFR	Code of Federal Regulations (Sammlung der Bundesrichtlinien in den USA, Titel 49: Transportation)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DOT	U.S. Department of Transportation
DGR	Dangerous Goods Regulations der IATA
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOL	End of Life
ERP	Europäische Recycling Plattform
EU-VRi	European Virtual Institute for Integrated Risk Management, Stuttgart (D)
EV	Elektrofahrzeug (Electric Vehicle)
EVS GTR	Electric Vehicle Safety Global Technical Regulation (eine informelle Gruppe innerhalb der UNECE)
FAA-USA	Federal Aviation Administration (Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten)
FFI	Norwegian Defence Research Establishment
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
GGBefG	Gefahrgutbeförderungsgesetz
GGVSEB	Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern)
GRS	Gemeinsames Rücknahme System
GTR	Global Technical Regulation
HF	Fluorwasserstoff
HOLM	House of Logistics & Mobility, Frankfurt
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMDG-Code	International Maritime Code for Dangerous Goods
IMO	International Maritime Organization
IATA	International Air Transport Association (Internationale Luftverkehrs-Vereinigung)
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission

IMO	Internationale Seeschiffahrts-Organisation
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologien
ISO	International Standardization Organization
JRC	Joint Research Centre
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LTO	Lithium-Titan-Oxid
NCA	Nickel-Cobalt-Aluminium
NHTSA	National Highway Transport and Safety Authority
NMC	Nickel-Mangan-Cobaltoxid
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Hersteller von Originalgeräten (Original Equipment Manufacturer) Wird in dieser Studie als Synonym für Fahrzeughersteller in der Automobilindustrie verwendet
PTJ	Projektträger Jülich
QSP	Qualitätssicherungsprogramm
R&D	Forschung und Entwicklung
RID	Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises Dangereuses Regulations Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail Regelung zur Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter
RoPax-Schiffe	Roll On Roll Off Schiff
RoRo-Schiffe	Kurzform für Roll On/Roll Off Schiffe, die gleichzeitig Ladung und Passagieren transportieren können
SOC	state of charge (Ladezustand)
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TF	Themenfeld
TR	Thermal Runaway
TP	Thermal Propagation
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
ULD	Unit Load Device (hier: Beförderungsbehälter Luftfahrt)
VDA	Verband der Automobilindustrie
VITO	Flemish institute for technological research
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Technik Baden- Württemberg
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

9.2 Literaturverzeichnis

- Addendum to the 57th edition of the IATA Dangerous Goods Regulations and to the 3rd edition of the IATA Lithium Battery Shipping Guidelines, or working papers of DGP/25, is available on the ICAO.* (kein Datum). Von <http://www.icao.int/safety/DangerousGoods/Pages/DGP25.aspx> abgerufen
- ADR 2015. (1. Januar 2015). *Anlage zur Bekanntmachung der Neufassung der Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) (in der ab dem 1. Januar 2015 geltenden Fassung).*
- ADR 2017. (25. Oktober 2016). *25. ADR-Änderungsverordnung (25. ADRÄndV) inklusive Anhang.*
- Alexander Del Regno, ZSW Ulm. (26. 02 2016). Von Pressemitteilung Zahl der Elektroautos weltweit auf 1,3 Millionen gestiegen: <http://www.zsw-bw.de/infoportal/presseinformationen/presse-detail/zahl-der-elektroautos-weltweit-auf-13-millionen-gestiegen.html> abgerufen
- Anderman, Dr. Menahem, Total Battery Consulting, Inc. (27 January 2016). Automotive Battery Conference. *xEV Industry Advances: Technology and Marke*. Mainz.
- Andreas Pfrang, IRC. (26. 03 2015). Battery energy storage testing for safe electrification of transport, Presentation at ZSW.
- ANSI. (May 2013). *Standardization Roadmap for Electric Vehicles*. Washington: American National Standards Institute.
- Bart Mantels, vito. (26. 03 2015). Safety testing approaches for large lithium ion battery systems, Presentation at ZSW.
- Bastien Caillard, EU-VRI. (26. 03 2015). Stationary batteries Li-ion safe deployment, Presentation at ZSW.
- Bundestag. (11. 6 2015). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2015, Teil I, Nr. 22, ausgegeben zu Bonn am 11. Juni 2015.
- Busch, Hajo. (2016). *LITHIUM-Batterien, Wie gefährlich sind LITHIUM-Batterien wirklich?* Deutscher Bundes-Verlag.
- Christophe Pillot, Avicenne Energy. (2015). The rechargeable battery market and main trends.
- Dittrich, D. T. (11 2015). Transport of Lithium Batteries. Karlstein.
- Galen Ressler. (18. 9 2014). Thermal Propagation Mitigation Assessment - A Battery System Approach, Presented at The Battery Show Conference.
- GDV, G. d. (VdS 3103: 2016-05 (02)). *Lithium-Batterien GDV-Merkblatt zur Schadenverhütung*. Publikation der deutschen Versicherer (GDV e. V.).
- Germanischer Lloyd, Abteilung CL-R-RT. (05. 12 2013). Studie zum Brandschutz bei der Beförderung von Fahrzeugen mit Elektroaggregaten oder mit Elektroantrieb auf RoRo- und RoPax-Schiffen, Bericht Nr. 2013.003 Version 2013-12-05.
- Gudula Schwan, BMVi. (kein Datum). Lithiumbatterien im Straßenverkehr, Fachkonferenz Lithiumbatterien in der Logistik, Frankfurt am Main (Folie 16). S. 2015.
- ICAO-TI. (2015-2016 edition). *Technical instructions for the safe transport of dangerous goods by air*.
- INERIS. (2011). *Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques - Analyse préliminaire des risques*.
- Jean-Michel, T. (22. 06 2011). Un rapport officiel met la voiture électrique sous haute tension. *Le Canard Enchaîné*.

- Johannes Rößner, TÜV Süd Battery Testing GmbH. (26. 03 2015). Interaction of aging and safety, Presentation at ZSW.
- Jürgen Kunkelmann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2015). *Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatz-taktischer Empfehlungen.*
- Michel Demissy, INERIS. (26. 03 2015). Preliminary risk analysis study related to electric vehicles, Presentation at ZSW.
- Robert Beyer FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH Dresden. (November 2013). *Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung.* Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST.
- Sebastian Fischhaber, A. R. (2016). *Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen.* Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW).
- Sissel Forseth, FFI. (26. 03 2015). Lithium batteries and safety, Presentation at ZSW.
- United Nations. (2015). *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods - Manual and Test Criteria.* New York and Geneva: United Nations.
- Weber-Lamberdière, M. (04. 07 2011). Frankreich warnt vor Elektroautos. *Focus Magazin.*
- X. Feng et al. (2016). *Applied Energy* 161 S. 168-180.

9.3 Bewertungsmatrix

Nr.	AP No	AP Name	Unterpunkt	Identifizierte Probleme / Risiken	Ursachen	Folgen	Schwere-grad	Eintrittswahr-scheinlichke-itt	Kontrollier-barkeit	Bewertungs-kennzahl BKZ
1	AP 1.1	Materials and Cells	Cell Design	Flawed or unsuitable cell design (including cell chemistry, anode materials, cathode materials, mechanical construction, cell case), Change of safety behaviour with age	Lack of design control or optimization - Unsuitable or incomplete tests - Incomplete or wrong definition of operating conditions - Worse safety behaviour with age not accounted for	Risk of fire and explosion - Recall of all effected vehicles	3	1	1	3
2	AP 1.1	Materials and Cells	During production	Manufacturing error (problems from wrong setup of production equipment or insufficient equipment capability, errors in cell assembly)	Insufficient quality of the production equipment - Flawed quality control - Quality of raw materials insufficient, human and organizational factors such as missing qualification, human error, working conditions etc.	Latent cell flaws which effect functional safety, Loss of electrical insulation -> short circuits -> loss of containment of flammable, toxic and corrosive materials -> thermal runaway, explosion, fire, dispersion of toxic materials	3	1	2	6
3	AP 1.1	Materials and Cells	During production	Contamination of cell materials or components (for example metal particles that can cause shorts)	Impurities in raw materials - Contamination by foreign materials in not closed processes - Metal abrasion of manufacturing equipment components with direct contact to the product	Self discharge - Risk of internal short -> loss of containment of flammable, toxic and corrosive materials -> thermal runaway, explosion, fire, dispersion of toxic materials	3	1	3	9
4	AP 1.1	Materials and Cells	Cell and battery testing	Risks in connection with evaluations, tests, fitness for purpose of components at production sites	Operator error due to missing information about components - Insufficient measures for dealing with risks or little known risks - After tests unsuitable handling of samples - Delayed reaction of the battery	Electric shocks, accidents during handling, thermal runaway -> risk of fire, explosion, release of environmetally damaging, toxic or corrosive materials	4	1	1	4
5	AP 1.1	Materials and Cells	During cell design and production	Insufficient passive safety measures	Lack of scientific knowledge and insufficient technology - missing or insufficient safety measures - wide distribution trigger point of safety device	leaking electrolyte, thermal runaway -> risk of fire, explosion, release of environmetally damaging, toxic or corrosive materials	3	1	1	3
6	AP 1.1	Materials and Cells	During operation	Wrong operating strategy	Lack of design control or optimization - Unsuitable or incomplete tests - Incomplete knowledge of cell properties - Changes in cell properties with age not accounted for	Recall of all effected vehicles	3	1	1	3
7	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Mechanical design failure	Lack of information, - Missing regulations - Human errors	Wrong battery design - Misdimensioning of components	1	1	1	1
8	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Electrical (Current related)	Lack of information, - Missing regulations - Human errors	Wrong battery design - Misdimensioning of components	2	1	1	2
9	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Electrical (Voltage related)	Direct and indirect contact with conductive parts	Electrical shock	4	1	1	4
10	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Electrical isolation resistance	Lack of information, - Missing regulations - Human errors	Wrong battery design - Misdimensioning of components - Early failures may occur	1	1	2	2
11	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	EMC	Lack of information, - Missing regulations - Human errors	Wrong battery design - Misdimensioning of components - Functional problems may occur	1	1	1	1
12	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Thermal (Operation)	lack of information, Missing regulations, human errors	Wrong battery design - misdimensioning of components - Functional limitations by BMS - Faster aging of cells and components may occur	2	1	1	2
13	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Crash	lack of information, Missing regulations, human errors	wrong battery design; misdimensioning of components	3	1	2	6
14	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Water immersion	non tight or damaged Battery housing or open (e.g. aircooled) battery	Isolation resistance fault - Electrical shock	2	1	2	4
15	AP 1.1 AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery Vehicle fire	Exposure to external fire	Vehicle Fire due to other, different reasons - External source of heat causes thermal runaway (TR) of cells	Burning Vehicle - Burning Battery - Emission of organic vapours, corrosive gases, respirable particles	4	1	3	12

Abschlussbericht Studie Batteriesicherheit

16	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Design of Battery	Thermal propagation	Wrong system design, wrong operation limits, severe cell failure	Avalanche effect through several cells - Emission of organic vapours, corrosive gases, respirable particles	3	1	2	6
17	AP 1.2 AP 1.4	Battery and Battery in EV	Life cycle stability	Safety relevance due to longterm behavior of cells - Ageing of battery	Misuse of cells out of specification; (e.g. Li plating, overtemperature) Potential reasons: malfunctions in battery structure and functionality due to long term use (charge and discharge)	Single cell out of specified operating window - System failure - Insufficient power - Cell failure - Overheated Cell	2	1	1	2
18	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Controls	Overcharge Protection	Failures in Voltage and current sensing or their evaluation. Faulty algorithms	Operation out of Limits, cell damage e.g. heating, and system failure	2	1	1	2
19	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Controls	Overdischarge Protection	Failures in Voltage and current sensing or their evaluation - Faulty algorithms	Operation out of Limits, cell damage, and system failure Potential risk of cell internal short after additional cycles	2	1	1	2
20	AP 1.2 AP 1.4	Battery and Battery in EV	Controls	Over and under temperature operation (including charging)	Failures in Temperature sensing or evaluation - Faulty algorithms.	Operation out of Limits, cell damage e.g. heating, and system failure	2	1	1	2
21	AP 1.2 AP 1.4	Battery and Battery in EV	Fast (DC) Charge control	Operation out of limits	Unreliable control system, communication failure - Potential reasons: wear and tear issues by user due to frequent manual handling, interoperability of vehicles and DC- charging station (technical tolerances of components from different manufacturers, which have to be connected, have to be maintained during complete life cycle)	Operation out of limits, cell damage e.g. heating, and system failure - Risks of electric shock, thermal impact, explosion, fire, emersion of toxic gases, environmental impact, masive reduction of battery life cycle	4	1	1	4
22	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Integration into Vehicle	Battery will be damaged due to vehicle operation or crash	Installation of inadequate battery system in crash zones or battery with insufficient mechanical protection	Damaged Batteries with isolation failures - Damaged cells	4	1	1	4
23	AP 1.2	Battery and Battery in EV	Battery Manufacturing	Batteries are not assembled according to design	Non failure avoiding design; insufficient quality (control)	All kind of failures which are not detected within system	2	1	1	2
24	AP 1.2 AP 1.4	Battery and Battery in EV	Modification of Battery by non authorized persons	Battery might be disassembled, modified, handled or operated in a not intended way	Insufficient knowledge of manipulator or non-OEM battery, which does not comply to OEM standards	Operation out of limits - Short cirquits or high voltage access during manipulation	4	1	3	12
25	AP 1.3	Transportation / Warehousing	Transportation/ warehousing in general and sensible cases (e.g. tunnels, closed rooms, ferries)	Transport accidents in general - Wrong packaging or handling - High fire load of batteries	Packaging solution/ fire protection does not cover all risks	Short circuits - Electric shock - Leakages - Fire - Toxic gas emissions	3	1	2	6
26	AP 1.3	Transportation / Warehousing	Transportation/ warehousing of damaged/defective batteries	Transport/warehousing of damaged/defective batteries - Not identified defect/damage	Batteries damaged in use or transport	Short circuits - Electric shock - Leakages - Fire - Toxic gas emissions	3	2	2	12
27	AP 1.3	Transportation / Warehousing	Transporting Cargo Aircraft general	Transport accidents in general - Wrong packaging or handling - High fire load of batteries	Packaging solution/ fire protection does not cover all risks	Risk of fire and/or explosions	4	1	2	8
28	AP 1.3	Transportation / Warehousing	Transportation Cargo Aircraft damaged/defective batteries	Transport/warehousing of damaged/defective batteries - Not identified defect/damage	Batteries damaged in use or transport	Risk of fire and/or explosions	4	2	2	16
29	AP 1.4	Use	Charging (everywhere)	thunderbolt/over voltage	Potential reason: short circuit	Thermal runaway, fire, toxic dispersion, environmental polution (air, ground water), masive reduction of battery life cycle	3	1	1	3
30	AP 1.2 AP 1.4	battery/battery in EV Use	Charging (everywhere)	Impact/risk of bidirectional charging on battery safety	Communication with charger; problems in entire system, vehicle, charging station, grid	Fire, dispersion of toxic gases, environmental polution etc., extreme reduction of battery life cycle	4	1	1	4

31	AP 1.2	battery/battery in EV Use	Charging (everywhere)	Impact of fast charging on battery safety	- high voltages and currents - problems in entire system, vehicle, charging station, grid	Fire, dispersion of toxic gases, environmental pollution etc., extreme reduction of battery life cycle	4	1	1	4
32	AP 1.2 AP 1.4	battery/battery in EV Use	Use in Traffic	Damage of high voltage components (Battery, cable) caused by mechanical impulse from vehicle bottom side during driving	Mechanical impulse from vehicle bottom side	Fire, dispersion of toxic gases, environmental pollution etc., extreme reduction of battery life cycle	3	1	3	9
33	AP 1.2 AP 1.4	battery/battery in EV Use	Use in traffic	Impact from environmental and road parameters on battery safety (humidity, exterior temperature, vibrations, shocks, horizontal and vertical acceleration	Extreme environmental impacts/conditions of use: humidity, exterior temperature, vibrations, shocks, horizontal/vertical acceleration	Single Cell discharge, system failure; insufficient power, Cell failure, Overheated Cell	1	1	1	1
34	AP 1.4 AP 2	Use and damage prevention/control	vehicle in closed environments	EV's in garages, on ferries, in tunnels	Closed environment, potential ventilation issues, no unhindered and fast access to vehicle	Potentially increased probability and severity of fire and toxic gases, problems to extinguish a burning battery	4	1	1	4
35	AP 1.2 AP 1.4	Battery/battery in EV Use	vehicle in car wash	Vehicle does not drive any more after wash procedure	Potential reason: Intrusion of water or humidity	Vehicle does not drive any more (no risk of electric shock for passengers or operator, due to galvanic insulated system)	1	1	1	1
36	AP 1.4	Use	Vehicle identification	Quick and clear identification of EV's for rescue services	In many cases no fast and clear identification of EV's possible without further information sources	Emergency procedures of conventional vehicles not in line with specifics of EV's - Risk of electric shock	4	2	2	16
37	AP 1.2 AP 1.4	Battery/battery in EV Use	Technical service, repair and technical supervision	Service- and repair activities in workshops - Risk of inadequate working procedures and internal processes with high voltage and battery technology	Non-observance of repair and service procedures	Electric shock, thermal impact, hot surfaces, fire, dispersion of toxic gases, extreme reduction of battery life cycle	4	1	2	8
38	AP 1.4	Use	Technical service, repair and technical supervision	Inspection issues during regular technical inspection (§29 StVZO)	Use of EV may cause safety relevant issues from EV specific components (battery, BMS)	Failures within a defined inspection procedure can not be recognized	2	1	2	4
39	AP 1.4	Use	Technical service, repair and technical supervision	No adequate handling of EV's by vehicle breakdown services (after vehicle breakdown)	No adequate information or equipment of the breakdown services personnel	Potential damage of the battery	2	1	2	4
40	AP 1.4	Use	Parking	Safety relevance during long term parking of EV's (over years)	Functionality issues due to long term non-use, HV, corrosion, leakage,... exists for very long time, without the 'normal' regular and mandatory checks during usage.	Potential damage of battery, corrosion, leakage, safety risk when operated after storage	3	1	2	6
41	AP 1.5	Reuse and Recycling	Second use in stationary applications by car manufacturers or in cooperation with car manufacturers	Unknown changes to cell behavior due to ageing- Insufficient or no access to SOH information in the BMS - Sudden failures due to age of battery (< 80% residual capacity)	Unforeseen change of cell safety behavior - Failure of cell or battery safety devices due to age - Failure of BMS	Accelerated or sudden loss of performance - Battery becomes unsafe even if operated in a more narrow window	2	2	1	4
42	AP 1.5	Reuse and Recycling	Collecting and Transportation	Unknown changes to cell behavior due to ageing- Insufficient or no access to SOH information in the BMS	Unforeseen change of cell safety behavior - Failure of cell or battery safety devices due to age - Inability to discharge battery	Increased risk in storage and transportation	2	2	2	8

9.4 Liste relevanter Dokumente

Hier folgt eine Liste der berücksichtigten Dokumente zum Thema Batteriesicherheit.

Name	Titel	Scope
IEC/TR 61850-90-7	IEC 61850 Standard - Interoperability for Advanced Protection and Control Applications	IEC 61850 is the new international standard of communications for substations. It enables integration of all protection, control, measurement and monitoring functions within a substation and provides the means for high-speed substation protection applications, interlocking and intertripping. It combines the convenience of ethernet with the performance and security which is essential in substations today.
SAE J1798	Recommended Practice for Performance Rating of Electric Vehicle Battery Modules	This SAE Recommended Practice provides for common test and verification methods to determine Electric Vehicle battery module performance. The document creates the necessary performance standards to determine (a) what the basic performance of EV battery modules is; and (b) whether battery modules meet minimum performance specification established by vehicle manufacturers or other purchasers. Specific values for these minimum performance specifications are not a part of this document. Rationale: Adding testing procedures
ANSI/UL 2580:2011		Batteries for Use in Electric Vehicles
IEC 61851	Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements (IEC 61851-1:2010)	IEC 61851-1:2010 applies to on-board and off-board equipment for charging electric road vehicles at standard a.c. supply voltages (as per IEC 60038) up to 1 000 V and at d.c. voltages up to 1 500 V, and for providing electrical power for any additional services on the vehicle if required when connected to the supply network. It includes characteristics and operating conditions of the supply device and the connection to the vehicle; operators and third party electrical safety, and the characteristics to be complied with by the vehicle with respect to the a.c./d.c. EVSE, only when the EV is earthed. This second edition cancels and replaces the first edition published in 2001. It constitutes a technical revision. The main changes with respect to the first edition of this standard are: <ul style="list-style-type: none"> - revision of connector definitions and current levels (Clause 8); - modification definition of pilot wire to pilot function; - division of Clause 9 to create Clauses 9 and 11; - Clause 9: specific requirements for inlet, plug and socket-outlet; - Clause 11: EVSE requirements: the basic generic requirements for charging stations; - renumbering of annexes; - deletion of previous Annex A and integration of charging cable requirements into new Clause 10; - Annex B becomes Annex A and is normative for all systems using a PWM pilot function with a pilot wire; Annex C becomes Annex B; - replacement of previous Annex D (coding tables for power indicator) with B.4 in Annex B using new values; - new informative Annex C describing an alternative pilot function system. <p>This publication is of high relevance for Smart Grid.</p>

IEC 62196-3	Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 3: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for d.c. and a.c./d.c. pin and contact-tube vehicle couplers	EC 62196-3:2014 is applicable to vehicle couplers with pins and contact-tubes of standardized configuration, herein also referred to as accessories , intended for use in electric vehicle conductive charging systems which incorporate control means, with rated operating voltage up to 1 500 V d.c. and rated current up to 250 A, and 1 000 V a.c. and rated current up to 250 A. This part of IEC 62196 applies to high power d.c. interfaces and combined a.c./d.c. interfaces of vehicle couplers specified in IEC 62196-1:2014, and intended for use in conductive charging systems for circuits specified in IEC 61851-1:2010, and IEC 61851-23:2014. This publication is to be read in conjunction with IEC 62196-1:2011.
IEC 62576 Ed. 1.0 b:2009	Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles - Test methods for electrical characteristics	EC 62576:2009 describes the methods for testing electrical characteristics of electric double-layer capacitor cells (hereinafter referred to as capacitor) to be used for peak power assistance in hybrid electric vehicles.
IEC 62660-2:2010		Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles – Part 2: Reliability and abuse testing for lithium-ion cells
IEC 62831 Ed. 1.0	User identification in Electric vehicle Service Equipment using a smartcard	
IEC 62840	Electric Vehicle Battery Swap System	Part 1: General requirements Scope: This standard gives the general requirements for battery swap system, which is for the purposes of swapping batteries of electric vehicles in a non-operational state when the battery swap system connected to the supply network. The power supply is up to 1000V a.c. or up to 1500V d.c, according to IEC 60038.
IEC 69180-1	Holding fixtures of abrasive sleeves; holding fixtures with shank for portable grinding machines	
IEC/TR 60784 Ed. 1.0 b:1984	Instrumentation for electric road vehicles	Applies to the instrumentation of electric road vehicles, excluding those items which are used as instrumentation in vehicles with internal combustion engines. Defines the type of instruments and signalling devices that could be fitted, defines how they should be fitted and how they should be treated. Has the status of a technical report.
IEC/TR 60786 Ed. 1.0 b:1984	Controllers for electric road vehicles	Applies to the equipment on the electric vehicle which controls the rate of energy transfer between the traction battery or batteries and the motor or motors. Outlines the minimum recommended requirements for the construction and performance of electric vehicle traction controllers. Has the status of a technical report.
ISO 12405-1 and -2		pack level performance testing

<p>ISO 12405-1:2011</p>		<p>Electrically propelled road vehicles – Test spec for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 1: High-power applications</p>
<p>ISO 12405-2</p>		<p>Electrically propelled road vehicles – Test spec for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 2: High-energy applications (in development)</p>
<p>ISO 12405-3</p>		<p>ISO 12405-3:2014 specifies test procedures and provides acceptable safety requirements for voltage class B lithium-ion battery packs and systems, to be used as traction batteries in electrically propelled road vehicles. Traction battery packs and systems used for two-wheel or three-wheel vehicles are not covered by ISO 12405-3:2014. ISO 12405-3:2014 is related to the testing of safety performance of battery packs and systems for their intended use in a vehicle. ISO 12405-3:2014 is not intended to be applied for the evaluation of the safety of battery packs and systems during transport, storage, vehicle production, repair, and maintenance services.</p>
<p>ISO 15118-1:2013</p>	<p>Road vehicles -- Vehicle to grid communication interface -- Part 1: General information and use-case definition</p>	<p>ISO 15118 specifies the communication between Electric Vehicles (EV), including Battery Electric Vehicles and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, and the Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE). As the communication parts of this generic equipment are the Electric Vehicle Communication Controller (EVCC) and the Supply Equipment Communication Controller (SECC), ISO 15118 describes the communication between these components. Although ISO 15118 is oriented to the charging of electric road vehicles, it is open for other vehicles as well.</p> <p>ISO 15118-1:2013 specifies terms and definitions, general requirements and use cases as the basis for the other parts of ISO 15118. It provides a general overview and a common understanding of aspects influencing the charge process, payment and load levelling.</p> <p>ISO 15118 does not specify the vehicle internal communication between battery and charging equipment and the communication of the SECC to other actors and equipment (beside some dedicated message elements related to the charging). All connections beyond the SECC, and the method of message exchanging are considered to be out of the scope as specific use cases.</p>
<p>ISO 23274-1:2013</p>	<p>Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements - Part 1: Non-externally chargeable vehicles</p>	<p>ISO 23274-1:2013 specifies a chassis dynamometer test procedure to measure the exhaust emissions and the electric energy and fuel consumption for the vehicles.</p> <p>It applies to vehicles with the following characteristics:</p> <ul style="list-style-type: none"> the vehicle is classified as passenger cars or light duty trucks, as defined in each regional annex; the nominal energy of the rechargeable energy storage system (RESS) is at least 2 % of the total energy consumption over an applicable driving test (ADT); internal combustion engine (ICE) only using liquid fuels (for example, gasoline and diesel fuel).

		<p>In the case of vehicles with ICE using other fuel [for example, compressed natural gas (CNG), liquefied petroleum gas (LPG), hydrogen], this part of ISO 23274 can apply except the measurement of consumed fuel; otherwise the measurement method for those using the corresponding fuel can apply.</p> <p>ISO 23274-1:2013 proposes procedures for correcting the measured emissions and fuel consumption of hybrid electric vehicles (HEVs), in order to obtain the values when the battery state of charge (SOC) of the RESS does not remain the same between the beginning and the end of an ADT.</p> <p>It can also be applied to measurement procedures for exhaust emissions and fuel consumption of externally chargeable HEVs when a vehicle is not externally charged and operated only in the charge sustaining (CS) state, as described in ISO 23274-2.</p> <p>For CS state, see ISO 23274-2.</p>
ISO 23274-2:2012	Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements - Part 2: Externally chargeable vehicles	
ISO 6469-1:2009		Electric road vehicles – Safety specifications – Part 1: On-board rechargeable energy storage system (RESS)
ISO 6469-3:2001		Electrically propelled road vehicles – Safety specification – Part 3: Protection of persons against electric shock
ISO 8714:2002		<p>Electric road vehicles - Reference energy consumption and range - Test procedures for passenger cars and light commercial vehicles</p> <p>This International Standard specifies test procedures for measuring the reference energy consumption and reference range of purely electrically propelled passenger cars and commercial vehicles of a maximum authorized total mass of 3 500 kg and maximum speed greater than or equal to 70 km/h.</p>
ISO/TR 11955:2008	Hybrid-electric road vehicles - Guidelines for charge balance measurement	ISO/TR 11955 describes procedures of charge balance measurement to ensure necessary and sufficient accuracy of a fuel consumption test on hybrid-electric vehicles (HEV) with batteries, which is conducted based on ISO 23274.
ISO/TR 8713:2012		<p>Electrically propelled road vehicles - Vocabulary</p> <p>ISO/TR 8713:2012 establishes a vocabulary of terms and the related definitions used in ISO TC22/SC21 standards. These terms are specific to the electric propulsion systems of electrically propelled road vehicles, i. e. battery electric vehicles (BEV), hybrid electric vehicles (HEV, PHEV), and (pure and hybrid electric) fuel cell vehicles (FCV, FCEV).</p>
NHTSA FMVSS 101		<p>Telematics – Driver Distraction</p> <p>Auto Alliance Driver Focus Telematics Guidelines; NHTSA Proposed Driver Distraction Guidelines; NHTSA FMVSS 101</p>
NHTSA FMVSS 305		<p>Crash Tests / Safety:</p> <p>Electric Powered Vehicles: Electrolyte Spillage and Electrical Shock Protection. Last revised 2011</p> <p>Audible Warning Systems:</p>

		NHTSA safety standard in development, incorporating portions of SAEJ2889-1, Countermeasure Performance Evaluation & Test Procedure. SAE standard is basis of ISO/NP 16254 (in development). UNECE WP.29 looking at global technical regulation (GTR)
SAE J 1634-2012		<p>Battery Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure</p> <p>This SAE Recommended Practice establishes uniform procedures for testing battery electric vehicles (BEV's) which are capable of being operated on public and private roads. The procedure applies only to vehicles using batteries as their sole source of power. It is the intent of this document to provide standard tests which will allow for determination of energy consumption and range for light-duty vehicles (LDVs) based on the Federal Emission Test Procedure (FTP) using the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) and the Highway Fuel Economy Driving Schedule (HFEDS), and provide a flexible testing methodology that is capable of accommodating additional test cycles as needed. Realistic alternatives should be allowed for new technology. Evaluations are based on the total vehicle system's performance and not on subsystems apart from the vehicle.</p> <p>NOTE: The range and energy consumption values specified in this document are the raw, test-derived values. Additional corrections are typically applied to these quantities when used for regulatory purposes (Corporate Average Fuel Economy, vehicle labeling, etc.).</p>
SAE J 1715	Hybrid Electric Vehicle (HEV) & Electric Vehicle (EV) Terminology	<p>This SAE Information Report contains definitions for energy storage system and battery terminology. It is intended that this document be a resource for those writing other battery, HEV and EV documents, specifications, standards, or recommended practices.</p> <p>Rationale:</p> <p>This document is being created to provide a reference standard for terminology relating to automotive energy storage systems and components. The document will focus on battery systems, subsystems, modules, cells, electrochemical elements and auxiliary components. Terminology for the testing, measurement, specification and use of battery systems is covered as they relate to automotive applications.</p>
SAE J 1715-2014		<p>Hybrid Electric Vehicle (HEV) and Electric Vehicle (EV) Terminology</p> <p>This SAE Information Report contains definitions for HEV and EV terminology. It is intended that this document be a resource for those writing other HEV and EV documents, specifications, standards, or recommended practices.</p>
SAE J 1715-2-2013		<p>Battery Terminology</p> <p>This SAE Information Report contains definitions for energy storage system and battery terminology. It is intended that this document be a resource for those writing other battery, HEV and EV documents, specifications, standards, or recommended practices</p>
SAE J 1766-2014	Recommended Practice for Electric, Fuel Cell and Hybrid Electric Vehicle Crash Integrity Testing	<p>Electric, Fuel Cell and Hybrid vehicles may contain many types of high voltage systems. Adequate barriers between occupants and the high voltage systems are necessary to provide protection from potentially harmful electric current and materials within the high voltage system that can cause injury to occupants of the vehicle during and after a crash. This SAE Recommended Practice is applicable to Electric, Fuel Cell and Hybrid vehicle designs that are comprised of at least one vehicle propulsion voltage bus with a nominal operating voltage greater than 60 and less than 1,500 VDC, or greater than 30 and less than 1,000 VAC. This Recommended Practice addresses post-crash</p>

		electrical safety, retention of electrical propulsion components and electrolyte spillage.
SAE J 2344-2010		<p>Guidelines for Electric Vehicle Safety</p> <p>This SAE Information Report identifies and defines the preferred technical guidelines relating to safety for vehicles that contain High Voltage (HV), such as Electric Vehicles (EV), Hybrid Electric Vehicles (HEV), Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV), fuel Cell Vehicles (FCV) and Plug-In fuel Cell Vehicles (PFCV) during normal operation and charging, as applicable. Guidelines in this document do not necessarily address maintenance, repair, or assembly safety issues. The purpose of this SAE Information Report is to provide introductory safety guideline information that should be considered when designing electric vehicles for use on public roadways. This document covers electric vehicles having a gross vehicle weight rating of 4536 kg (10 000 lb) or less that are designed for use on public roads.</p>
SAE J 2711-2002	Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-Duty Vehicles	<p>This document describes a test procedure for rating peak power of the Rechargeable Energy Storage System (RESS) used in a combustion engine Hybrid Electric Vehicle (HEV). Other types of vehicles with non-fossil fuel primary engines, such as fuel cells, are not intended to use this test procedure. The purpose of this document is to provide a test procedure to determine RESS peak power so that a vehicle's ratio of RESS peak power rating to the sum of the Internal Combustion Engine power rating and the RESS peak power rating can be established. Because of the vehicle-specific nature of the RESS control and environment, this test is designed to calculate the RESS peak power for a specific vehicle. As a result, the same RESS used in a different vehicle must be retested to determine its peak power rating in the new HEV environment.</p>
SAE J 2758-2007	Determination of the Maximum Available Power from a Rechargeable Energy Storage System on a Hybrid Electric Vehicle	<p>This SAE Recommended Practice was established to provide an accurate, uniform and reproducible procedure for simulating use of heavy-duty hybrid- electric vehicles (HEVs) and conventional vehicles on dynamometers for the purpose of measuring emissions and fuel economy. Although the recommended practice can be applied using any driving cycle, the practice recommends three cycles: the Manhattan cycle, representing low-speed transit bus operation; the Orange County Transit Cycle, representing intermediate-speed bus operation; and the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) cycle representing high-speed operation for buses and tractor-trailers. This document does not specify which emissions constituents to measure (e.g., HC, CO, NOx, PM, CO₂), as that decision will depend on the objectives of the tester. While the recommended practice was developed specifically to address the issue of measuring fuel economy and emissions for hybrid-electric heavy-duty vehicles on a chassis dynamometer, the document can also be applied to chassis testing of other heavy- duty vehicles. This document builds upon SAE J1711, the light-duty HEV chassis recommended practice. As in SAE J1711, this document defines a hybrid vehicle as having both a rechargeable energy storage system (RESS) capable of releasing and capturing energy and an energy-generating device that converts consumable fuels into propulsion energy. RESS specifically included in the recommended practice are batteries, capacitors and flywheels, although other RESS can be evaluated utilizing the guidelines provided in the document. Further, the recommended practice provides a detailed description of state of charge (SOC) correction for charge-</p>

		sustaining HEVs. This document also has a section which provides recommendations for calculating fuel economy and emissions for charge-depleting hybrid-electric vehicles. It should be noted that most heavy-duty vehicles addressed in this document would be powered by engines that are certified separately for emissions. The engine certification procedure appears in the Code of Federal Regulations, Title 40.
SAE J 2894-1-2011	Power Quality Requirements for Plug-In Electric Vehicle Chargers	The intent of this document is to develop a recommended practice for PEV chargers, whether on-board or off-board the vehicle, that will enable equipment manufacturers, vehicle manufacturers, electric utilities and others to make reasonable design decisions regarding power quality. The three main purposes are as follows: 1. To identify those parameters of PEV battery charger that must be controlled in order to preserve the quality of the AC service. 2. To identify those characteristics of the AC service that may significantly impact the performance of the charger. 3. To identify values for power quality, susceptibility and power control parameters which are based on current U.S. and international standards. These values should be technically feasible and cost effective to implement into PEV battery chargers. SAE J2894/2 Power Quality Requirements for Plug-In Electric Vehicle Chargers - Test Methods will describe the test methods for the parameters / requirements in this document.
SAE j1766:2005		Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing (under revision)
SAE J1772TM	Recommended Practice for Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. Defacto U.S. standard	SAE-J1772 Standard defines: Charging capacity & operating voltage by "Level" – AC 1 & 2 Electrical safety & circuit protection of Electrical safety & circuit protection of EVSE Physical properties of the connector EV to EVSE communications & charging controls
SAE J2464:2009	Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing	This SAE Recommended Practice is intended as a guide toward standard practice and is subject to change to keep pace with experience and technical advances. It describes a body of tests which may be used as needed for abuse testing of electric or hybrid electric vehicle Rechargeable Energy Storage Systems (RESS) to determine the response of such electrical energy storage and control systems to conditions or events which are beyond their normal operating range. Abuse test procedures in this document are intended to cover a broad range of vehicle applications as well as a broad range of electrical energy storage devices, including individual RESS cells (batteries or capacitors), modules and packs. This document applies to vehicles with RESS voltages above 60 volts. This document does not apply to RESS that uses mechanical devices store energy (e.g., electro-mechanical flywheels).
SAE J2836/5	Use Cases for Wireless Charging Communication for Plug-in Electric Vehicles	This SAE Information Report SAE J2836/6™ establishes use cases for communication between plug-in electric vehicles and the EVSE, for wireless energy transfer as specified in SAE J2954. It addresses the requirements for communications between the on-board charging system and the Wireless EV Supply Equipment (WEVSE) in support of detection of the WEVSE, the charging process, and monitoring of the

		<p>charging process.</p> <p>Since the communication to the charging infrastructure and the power grid for smart charging will also be communicated by the WEVSE to the EV over the wireless interface, these requirements are also covered. However, the processes and procedures are expected to be identical to those specified for V2G communications specified in SAE J2836/1. Where relevant, the specification notes interactions that may be required between the vehicle and vehicle operator, but does not formally specify them. Similarly communications between the on-board charging sub-system and the on-board vehicle electronics is not formally specified in this document.</p> <p>This is the 1st version of this document and completes step 1 effort that captures the initial objectives of the SAE task force. The intent of step 1 was to record as much information on "what we think works" and publish. The effort continues however, to step 2 that allows public review for additional comments and viewpoints, while the task force also continues additional testing and early implementation. Results of step 2 effort will then be incorporated into updates of this document and lead to a republished version.</p> <p>Rationale:</p> <p>The use cases described here identify the equipment (system elements) and interactions to support wireless energy transfer for plug-in vehicles, as further described in SAE J2847/6. Key system elements include the vehicle's rechargeable energy storage system (RESS), power conversion equipment (on-board and off-board), utility meter, optional advisory sub-meter (EUMD), load management system (LMS), and equipment for control, monitoring, and communication. System elements may be optionally packaged in various ways (either separately or in combination) to deliver implementations tailored to a given environment, such as a residential, public or commercial charging location. Implementations may also vary in relation to the vehicle itself. The charging control technology resides on the vehicle and premises.</p> <p>Use cases are technology-neutral, leaving implementers free to choose technological solutions appropriate to specific scenarios. For example, depending upon the situation, communication may occur via local wireless (ZigBee, Wi-Fi, etc.), vehicle telematics, long-range wireless (GSM, CDMA, WiMax, etc.), Internet protocols, or a combination of these methods.</p>
SAE J2894		Power Quality Requirements for Plug-in Electric Vehicle Chargers. Part 1 requirements published Dec 2011
SAE J2907;J2908	<p>SAE J2907, test method/conditions for rating performance of electric propulsion motors in hybrid electric and battery electric vehicles</p> <p>SAE J2908, test method/conditions for rating performance of hybrid-electric and battery electric</p>	<p>This work will support ongoing efforts with J2908 to define and establish unified requirements for measuring hybrid and plug in hybrid electric power levels.</p> <p>Rationale:</p> <p>Current electric powertrain configurations are widely varied with insufficient criteria to make adequate vehicle to vehicle comparisons. A standard for testing and specifying electric motor ratings is needed to establish a unified consensus for evaluation purposes.</p>

	vehicle propulsion systems reflecting thermal and battery capabilities and limitations	
SAE J2929	Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery System Safety Standard - Lithium-based Rechargeable Cells	<p>This SAE Standard defines a minimum set of acceptable safety criteria for a lithium-based rechargeable battery system to be considered for use in a vehicle propulsion application as an energy storage system connected to a high voltage power train. While the objective is a safe battery system when installed into a vehicle application, this Standard is primarily focused, wherever possible, on conditions which can be evaluated utilizing the battery system alone. As this is a minimum set of criteria, it is recognized that battery system and vehicle manufacturers may have additional requirements for cells, modules, packs and systems in order to assure a safe battery system for a given application. A battery system is a completely functional energy storage system consisting of the pack(s) and necessary ancillary subsystems for physical support and enclosure, thermal management, and electronic control.</p> <p>Rationale: Existing propulsion battery system safety documents define evaluation methods and make recommendations for battery system performance. They do not define specific pass/fail safety performance criteria. In order to provide consistency within the industry which supports innovation and public confidence, such criteria are necessary.</p>
SAE J2929:2011		Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery System Safety Standard Lithium-based Rechargeable Cells (under revision)
SAE J2931/7	PLC Communication for Plug-in Electric Vehicles	<p>This SAE Recommended Practice J2931/3 establishes the requirements for physical layer communications using Power Line Carrier (PLC) between Plug-In Vehicles (PEV) and the EVSE. This also enables the onward communications via an EVSE bridging device to the utility smart meter or Home Area Network (HAN). This is known as Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) and is Power Line Carrier (PLC) that can be transmitted using either the J1772™ Control Pilot circuit or the mains (AC or DC power circuits).</p> <p>Rationale: This SAE Recommended Practice is intended to provide a common set of requirements, including testing and certification guidance, as various suppliers build their product and interface with several Plug-In Vehicle manufacturers and the HAN/EMS/Utility to assure smart grid interoperability compliance.</p>
SAE J2953	Test Procedures for the Plug-In Electric Vehicle (PEV) Interoperability with Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)	<p>This SAE Recommended Practice SAE J2953/2 establishes the test procedures to ensure the interoperability of Plug-In Vehicles (PEV) and Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) for multiple suppliers.</p> <p>Rationale: This document defines the test procedures for interoperability and has completed the initial version that correlates with J2953/1 for interoperability requirements for the J1772™ control pilot and prox circuits. This revision (V2) will add DC Charging and the digital communications associated with it. The update to the DC Charging signals are included in J2847/2 and recent testing with some PEVs and EVSEs will launch this effort to define interoperability already accomplished and expand as more product is included. Any diagnostics resulting from this will also be added to J2836/4™ Use Cases and J2847/4 Messages and Signals so the interaction of issues can be</p>

		conveyed.
SAE J2954, UL 2750, IEC 69180-1	<p>Complete work on SAE J2954, UL 2750, IEEE deliverables and IEC 69180-1.</p> <p>Update: The text and roadmap version 1.0 gap statement and recommendation have been modified to account for IEEE and IEC/TC 69 work, with both added as potential developers.</p>	
SAE J2954/ UL 2750	<p>Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles</p>	<p>- Establishes minimum performance and safety criteria for wireless charging of electric and plug-in vehicles. Team to create a technology matrix to initially evaluate multiple technologies (Inductive, Magnetic resonance, etc.) and end up on common approach. -Charging Locations: Residential, On-Road (Parking Lot, Roadway) -Level 1,2,3 Charging</p> <p>Rationale:</p> <p>The current SAE Standard SAE J1772 establishes the wired charging standard. In order to give the customer an option to safely charge their vehicle also wirelessly, a TIR is to be created. The advantages that wireless charging gives the customer are as follows: -Customer transparency and seamlessness for EV/PHEV charging without having to physically connect. -Smart Grid programmability -Global Harmonization for wireless power transfer standard (SAE as a focal point) -Wireless vehicle to Grid communications (coordinated with other SAE committees) This TIR defines acceptable criteria for minimum performance, safety and testing for wireless charging of electric and plug-in electric vehicles. It establishes AC Level 1, AC Level 2 and DC Level 3 charge levels and specifies a location for wireless charging. Adoption of a standard for wireless power transfer based on charge level will enable selection of an appropriate charging based on vehicle requirements thus allowing for better vehicle packaging, reduced cost, and ease of customer use.</p>

<p>SAE J2974;J2984</p>	<p>Technical Information Report on Automotive Battery Recycling</p> <p>Identification of Transportation Battery Systems for Recycling Recommended Practice</p>	<p>This SAE Technical Information Report provides information on Automotive Battery Recycling. This document provides a compilation of current recycling definitions, technologies and flow sheets and their application to different battery chemistries.</p> <p>Rationale:</p> <p>Battery Recycling is an integral part of the lifecycle management of vehicles. Currently there is a lack of recommended practices and standards for automotive battery recycling. Many of the materials contained within batteries are regulated as hazardous materials. Proper recycling will minimize/eliminate the need for hazardous waste disposal and pollution. Recycling can provide market stabilization by returning critical materials back into the manufacturing process and avoid dependence on primary sources. A SAE Technical Information Report on Automotive Battery Recycling will provide a compilation of recycling methodologies and current practices for the automotive, battery and recycling industry. This will aide in determining recycling routes and methods available for new battery technologies.</p> <p>SAE J 2984-2013:The chemistry identification system is intended to support the proper and efficient recycling of rechargeable battery systems used in transportation applications with a maximum voltage greater than 12V (including SLI batteries). Other battery systems such as non-rechargeable batteries, batteries contained in electronics, and telecom/utility batteries are not considered in the development of this specification. This does not preclude these systems from adapting the format proposed if they so choose.</p>
<p>SAE J2990</p>	<p>Hybrid and EV First and Second Responder Recommended Practice</p>	<p>xEVs involved in incidents present unique hazards associated with the high voltage system (including the battery system). These hazards can be grouped into 3 categories: chemical, electrical, and thermal. The potential consequences can vary depending on the size, configuration and specific battery chemistry. Other incidents may arise from secondary events such as garage fires and floods. These types of incidents are also considered in the recommended practice (RP). This RP aims to describe the potential consequences associated with hazards from xEVs and suggest common procedures to help protect emergency responders, tow and/or recovery, storage, repair, and salvage personnel after an incident has occurred with an electrified vehicle. Industry design standards and tools were studied and where appropriate, suggested for responsible organizations to implement.</p> <p>Nickel metal hydride (NiMH) and lithium ion (Li-ion) batteries used for vehicle propulsion power are the assumed battery systems of this RP. These battery chemistries are the prevailing technologies associated with high voltage vehicle electrification today and the foreseeable future. The hazards associated with these specific battery chemistries are addressed in this RP. Other chemistries and alternative propulsion systems including Fuel Cells are not considered in this version of SAE J2990.</p> <p>Rationale:</p> <p>Electrification of the vehicle industry is increasing at a rapid pace with many countries adopting goals for increasing the number of electrified vehicles (xEVs), including a US goal of having one million PHEV's on the road by 2015 and China's goal of 500 000 new energy vehicles in production by the end of 2015. This new propulsion technology in the automotive sector has raised concerns for these vehicles when involved in severe crashes because of the potential consequences associated with new hazards from the high voltage systems on board. While the high voltage system, under most crash situations, is likely to</p>

		<p>be protected and maintain electrical isolation from the rest of the vehicle, a rare but possible severe crash may compromise some of the safety features of the high voltage system. Due care needs to be taken when working around the electrified propulsion systems and components or charging systems, regardless of their condition.</p> <p>Some progress has been made in educating first responders about safe procedures when working around xEVs involved in crashes. However, considerable work is needed to develop common and consistent procedures for emergency responders across the automotive industry. In addition, further effort is needed to identify and address the consequences of the new hazards associated with xEVs for second responders consisting of tow, storage, repair and salvage personnel.</p>
UL 2251	Standard for Plugs, Receptacles, and Couplers for Electric Vehicles	<p>These requirements cover plugs, receptacles, vehicle inlets, vehicle connectors, and breakaway couplings, rated up to 800 amperes and up to 600 volts ac or dc, intended for conductive connection systems, for use with electric vehicles. These devices are for use in either indoor or outdoor non-hazardous locations.</p>
UL 2594	Electric Vehicle Supply Equipment	<p>This outline covers electric vehicle (EV) supply equipment, rated a maximum of 250 V ac, with a frequency of 60 Hz, and intended to provide power to an electric vehicle with an on-board charging unit. This outline covers electric vehicle supply equipment intended for use where ventilation is not required.</p> <p>Provide power to an electric vehicle with an on-board charging unit.</p>