

Abschlussbericht Forschungsprojekt StarTest

Angaben zum Vorhaben	
Zuwendungsempfänger	WZL der RWTH Aachen und PEM der RWTH Aachen
Förderkennzeichen	16EMO0317
Vorhabenbezeichnung	Standardisierte Prüfverfahren für die Genehmigung und Testverfahren für die Produktion von Batterien für Elektrofahrzeuge für den chinesischen sowie den deutschen Markt (StarTest)
Laufzeit des Vorhabens	Von 01.04.2018 Bis 30.06.2021
Berichtszeitraum	Von 01.04.2018 Bis 30.06.2021
Projektleitung	Tobias Adlon, M. Sc. Oberingenieur Abteilung Fabrikplanung Lehrstuhl für Produktionssystematik Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Inhaltsverzeichnis:

1. Aufgabestellung des Forschungsvorhabens StarTest (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)	2
2. Ablauf und Mittelplanung für das Forschungsvorhaben StarTest (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98).....	3
3. Stand der Technik und Wissenschaft: Batteriehomologation & -produktion (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)5	
4. Ergebnisse des Forschungsvorhabens StarTest: Aufzählung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)	12
5. Fortschritte bei Testmethoden für die Batteriehomologation & Batterieproduktion (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)	16
6. Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)	17
7. Eingehende Darstellung zu erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes StarTest (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98).....	19
8. Schlusswort zum Forschungsvorhaben	19
9. Anhang: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse des Vorhabens StarTest	20

1. Aufgabestellung des Forschungsvorhabens StarTest (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

1.1 Motivation:

Das BMBF Forschungsprojekt „StarTest“ fokussiert die Entwicklung und Validierung von standardisierten Prüfverfahren für die Genehmigung und Testverfahren im Rahmen der Produktion von Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen für den chinesischen sowie den deutschen Markt.

Die Batterie stellt die Schlüsselkomponente für die umfassende Befähigung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen dar. Neben hohen Energiespeicherdichten ist insbesondere die Sicherheit ein wichtiger Aspekt im Rahmen der Entwicklung neuer Batteriesysteme. Bisher existieren keine einheitlichen Prüf- und Testverfahren für die Produktion und die Genehmigung der Batterien in Elektrofahrzeugen. Ziel im Forschungsprojekt „StarTest“ ist vor diesem Hintergrund, aus wissenschaftlichen Untersuchungen zu Nutzeranforderungen, Fehlermechanismen und Testmethoden allgemeingültige Prüf- und Zulassungsverfahren für Batterien im deutschen und chinesischen Markt abzuleiten. Die ausgearbeiteten Verfahren sollen in einer laborbasierten Fertigung validiert und abschließend in Form eines Normungsvorschlags an die zuständigen Normungsinstitutionen in China und Deutschland überreicht werden. Dadurch sollen langfristig einheitliche Standards für Prüf- und Testverfahren festgelegt werden, welche zu einer Steigerung der Sicherheit im Bereich der Batterietechnik führen. Weiterhin können Entwicklungsaufwände systematisch reduziert und potentielle Kostensenkungen im Rahmen des Testings, der Produktion und der Zulassung von Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge realisiert werden. Im Projektverlauf werden entsprechende Konsortialpartner in der Wertschöpfungskette bereits früh in den Gestaltungsprozess der Normenvorschläge miteinbezogen, um vorauswirkend eine praxisnahe Integrationsumgebung für die, dem Projekt entspringenden, Normenvorschläge zu schaffen.

In diesem Projekt wird die Richtlinie zur Förderung von Initiativen auf dem Gebiet der „Technologieforschung für die Elektromobilität im Verbund mit China (EV-China)“ adressiert. Das Forschungsprojekt ist dem dort definierten Themengebiet „Simulations-, Validierungs- und Testmethoden für Komponenten und Systeme der Elektromobilität“ zuzuordnen.

1.2 Zieledimension:

Aufbauend auf der oben genannten Problemstellung werden zwei Ziele angestrebt:

Ziel 1) Entwicklung eines standardisierten Prüfverfahrens für die Genehmigung von Batterien für Elektrofahrzeuge für den chinesischen sowie den deutschen Markt. Dieses standardisierte Prüfverfahren soll in Form eines Normvorschlags an die zuständigen Normungsinstitutionen für China und Deutschland überreicht werden.

Ziel 2) Entwicklung eines darauf aufbauenden standardisierten Testverfahrens für die Produktion von Batterien für Elektrofahrzeuge für den chinesischen sowie den deutschen Markt. Das standardisierte Testverfahren soll Automobil- bzw. Batterieherstellern zur Verfügung gestellt werden, sodass diese ihre Prozesse in der Qualitätssicherung daran ausrichten können.

Durch den erzielten Fortschritt im Bereich der Normierung und Standardisierung sollen langfristig die Kosten für Traktionsbatterien gesenkt werden, wodurch Elektromobilität für den Nutzer günstiger würde. Das Projekt zielt darauf ab, der Elektromobilität den Weg zu ebnet.

1.3 Voraussetzungen und direkte Projektpartner:

Die Antragsteller, in diesem Fall die Institute PEM und WZL der RWTH Aachen, streben eine einheitliche Abwicklung der Projektinhalte im Forschungsprojekt „StarTest“ an. Das PEM, als eines der führenden Forschungsinstitute in der Batterieproduktion in Deutschland, bringt seine Kompetenzen im Bereich der Batteriezellen- und Batteriepackmontage sowie der Zertifizierung ein. Das WZL, als eines der führenden Forschungsinstitute in der Produktionsplanung, bringt seine Stärken im Forschungsprojekt in die Nutzeranforderungsanalyse und die Analyse von Qualitäts- und Testverfahren in der Produktion ein. Darauf aufbauend entwickelt das WZL ein Testverfahren für eine mögliche Normung von Produktionssystemen und setzt diese federführend um.

2. Ablauf und Mittelplanung für das Forschungsvorhaben StarTest (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

2.1 Ablaufplanung für das Projekt

Das Forschungsvorhaben StarTest lässt sich zeitlich in eine Analyse- und Entwicklungsphase aufteilen. Zu Beginn wurden im Rahmen einer Status Quo Analyse (AP 1.1, AP 1.2, AP 1.3) das Nutzungsverhalten für elektrifizierte Fahrzeuge sowie Analysen zum Stand der Technik der Homologationsverfahren und Testmethoden im Rahmen der Batterieproduktion durchgeführt. Im Anschluss wurden die Ergebnisse für die Entwicklung und Harmonisierung der Testmethoden (AP 2.1, AP 2.2) für die Homologation und im Rahmen der Produktion herangezogen. Die detaillierte Zeitplanung kann Abbildung 1 entnommen werden. Aufgrund von Restriktionen und gesetzlichen Sicherheitsauflagen, u.a. durch die weltweite COVID-19-Pandemie, kam es zu unvorhersehbaren Projektverzögerungen im zeitlichen Ablauf des Projektes. Vor diesem Hintergrund wurde das Projekt nach Genehmigung durch den Projektträger um 3 Monate bis zum 31.06.2021 kostenneutral verlängert. Zum 30.06.2021 konnten alle geplanten Arbeitspakete abgeschlossen werden.

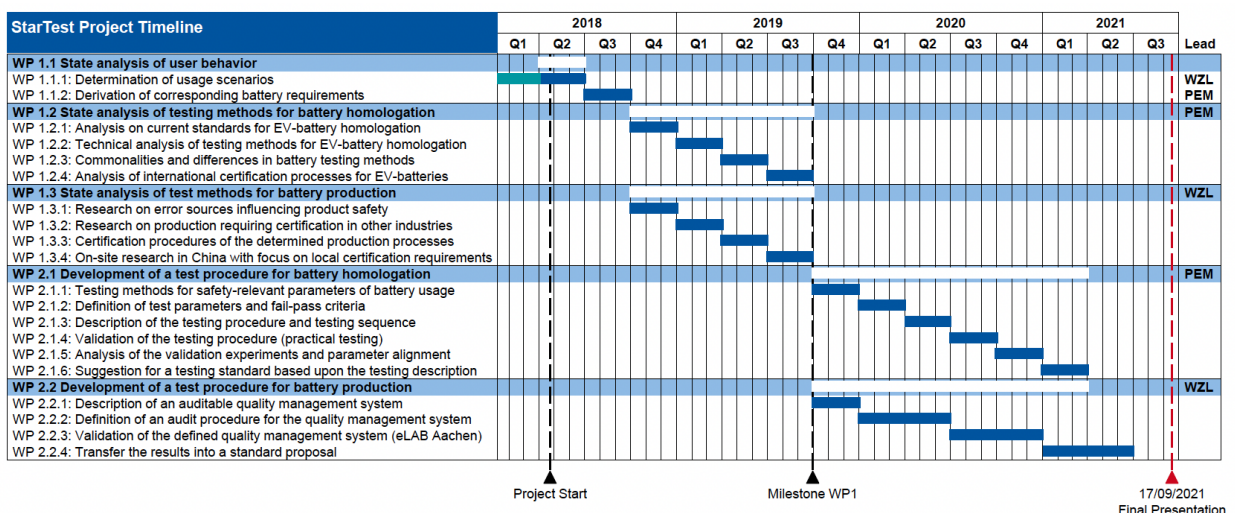


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf und Arbeitspakete des Forschungsprojekts StarTest

2.2 Ausgabenplanung für das Projekt

Die konsolidierte Ausgabenplanung für abgerufene Mittel im Jahr 2018, 2019, 2020 und 2021 der beteiligten Institute findet sich nachfolgend in Tabelle 1. Eine detaillierte Betrachtung kann dem eingereichten Verwendungsnachweis zum Projekt StarTest entnommen werden. Die Mittelplanung und Verausgabung entsprach im weitesten Sinne dem ursprünglich geplanten und bereitgestellten Mitteln. In Summe konnten **5.029,06 €** bis zum 30.06.2021 nicht verausgabt

werden. Die nicht verausgabten Mittel wurden nicht weiter zur Zielerreichung im Forschungsvorhaben benötigt.

Kostentyp	#	Gesamthaft bereitgestellte Mittel	Abgerufen laut Verwendungsnachweis				Gesamthaft abgerufene Mittel	Delta verausgabte Mittel
			2018	2019	2020	2021		
Personal: Beschäftigte E12-E15	0812	258.841,00 €	53.212,23 €	100.612,01 €	94.847,90 €	15.562,63 €	264.234,77 €	- 5.393,77 €
Personal: Beschäftigte E1-E11	0817	49.256,00 €	- €	24.321,00 €	19.789,16 €	1.357,04 €	45.467,20 €	3.788,80 €
Personal: Beschäftigungsentgelte	0822	26.400,00 €	5.306,00 €	11.837,66 €	9.311,33 €	993,40 €	27.448,39 €	- 1.048,39 €
Vergabe von Aufträgen	0835	28.632,00 €	- €	- €	- €	28.631,00 €	28.631,00 €	1,00 €
Sonstige allg. Verwaltungsausgaben	0843	21.050,00 €	- €	6.895,08 €	1.371,30 €	8.308,39 €	16.574,77 €	4.475,23 €
Dienstreisen	0846	28.094,00 €	3.282,81 €	21.405,00 €	450,00 €	- 250,00 €	24.887,81 €	3.206,19 €
Summe (0861)		412.273,00 €	61.801,04 €	165.070,75 €	125.769,69 €	54.602,46 €	407.243,94 €	5.029,06 €
Zzgl. Projektpauschalen (0866)		494.727,60 €	74.161,25 €	198.084,90 €	150.923,63 €	65.522,95 €	-	-

Tabelle 1: Aufteilung der Mittelverwendung nach Verwendungsnachweis

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die erfolgten Forschungsarbeiten im Vorhaben StarTest sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung weitestgehend entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Darüber hinaus waren keine Ressourcen für das Projekt notwendig.

2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben den Forschungsinstituten der RWTH Aachen (WZL & PEM) beteiligte sich die Tsinghua University als eine der führenden Universitäten Asiens im Forschungsprojekt „StarTest“ an der Ausrichtung der angestrebten Norm an die Anforderungen des chinesischen Markts und der chinesischen Behörden. Neben den Forschungsinstituten beteiligen sich auch die Firmen Street-Scooter Research, e.GO Mobile AG, CATL und die Great Wall Motor Company als assoziierte Projektpartner an dem Forschungsprojekt, um den Transfer von der wissenschaftlichen Theorie in die wirtschaftliche Praxis sicherzustellen. Als weiteren Projektpartner sei die TÜV Rheinland Consulting GmbH zu nennen, welche für die Erstellung des Normenentwurfs (2.1.6 & 2.2.4) in Unterauftrag genommen wurde.

3. Stand der Technik und Wissenschaft: Batteriehomologation & -produktion (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

3.1 Testing der Batterien

Für die Batterie existieren viele verschiedene Varianten für unterschiedliche Anwendungen, insbesondere in mobilen Anwendungen der Elektromobilität. Die Lithium-Ionen-Technologie kristallisiert sich dabei derzeit als die optimale Lösung heraus. Aufgrund ihrer technologischen Eigenschaften muss der Betrieb von Lithium-Ionen-Batterien bei optimalen Randbedingungen sichergestellt werden. Dies erfordert einen fachgerechten Konstruktions- und Entwicklungsprozess. Um ein sicherheitsgerechtes Batteriedesign abzuprüfen, werden Batterietests eingesetzt, die für eine Nutzung der Batterie im Straßenverkehr durchlaufen werden müssen. Die Tests sind so gestaltet, dass bei erfolgreichem Durchlaufen die Belastungen der Batterie, welche den Lebenszyklus nachbilden, nicht zu sicherheitskritischen Situationen führen können.

Daher ist ein Fokus des Forschungsprojekts eine nutzergerechte Zertifizierung, die die im Lebenszyklus der Batterie auftretenden Belastungen möglichst genau abbildet. Es existieren zahlreiche Nutzeranalysen im Bereich der Elektromobilität, sowohl für deutsche als auch für chinesische Nutzer. Beispielhaft seien die Projekte E-Carflex, SMART-EM und CROME genannt. Im Rahmen des Forschungsprojekts CROME wird das Verhalten von Nutzern von Elektrofahrzeugen im Raum Stuttgart/Strasbourg analysiert. Außerdem bestehen zahlreiche Prüfmethoden für die Genehmigung von Batterien für bestimmte Märkte, wie z. B. China oder Deutschland. Eine Genehmigung von Batterien z. B. für den chinesischen oder deutschen Markt im Einklang mit den dort geltenden Gesetzen ist bereits heute gewährleistet. Beispielhaft sind folgende Richtlinien genannt:

- Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles, Performance testing for lithium-ion cells (IEC 62660-1/2)
- Electric and hybrid electric vehicle, Rechargeable Energy Storage System (RESS), Safety and abuse testing (SAE J2464)
- Abuse test manual for electric and hybrid electric vehicles applications (SAND 2005-3123)
- FreedomCAR battery test manual for power-assisted hybrid electric vehicles (DOE/ID-11069)
- FreedomCAR 42V battery test manual (DOE/ID-11070)
- FreedomCAR ultracapacitor test manual (DOE/ID-11173)
- Transportation of lithium batteries (UN 38.3)
- Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transportation (IEC 62281)
- Lifecycle testing of electric vehicle battery modules (SAE J2288)
- ECE R 100
- UL 2271

Die Vielzahl von Unterschieden in den Testparametern der genannten Richtlinien deutet jedoch darauf hin, dass eine systematische Ableitung der Testverfahren nach wissenschaftlichen Kriterien bisher nicht erfolgt ist. Hier stellt die im Vorhaben gewählte, durchgängige Systematik der Testauswahl und -parametrisierung sicher, dass die Prüfnorm in einem internationalen Umfeld nachvollzogen und akzeptiert werden kann.

Aktuelle Lithium-Ionen-Batteriepacks sind kostenintensiv, da sie aufgrund der Zell- und Anforderungsvarianz individuell entwickelt werden und gleichzeitig hohe Sicherheitsanforderungen erfül-

len müssen. Neben den hohen Entwicklungs- und Herstellungskosten spielen jedoch auch die Zertifizierungskosten eine bedeutende Rolle. Wünschenswert ist die Reduktion der Zertifizierungskosten durch möglichst allgemeingültige Zertifizierungsprozesse.

Dem steht jedoch die beschriebene Vielzahl an nationalen und regionalen Zertifizierungsstandards entgegen. Bei einer Zulassung der Batterie erhöht sich die Komplexität der Zulassung um mehrere Dimensionen. Auch die Anforderungen durch die Zertifizierungsnormen, die im Entwicklungsprozess der Batterie berücksichtigt werden müssen, stellen durch ihre unterschiedlichen Ausprägungen eine besondere Herausforderung für die Batterie- und Fahrzeughersteller dar.

3.2 Produktion der Batterien

In der Vergangenheit kam es immer wieder zu Fällen, in denen ein Versagen des Batteriesystems nicht auf Mängel im Produktdesign, sondern auf Mängel in der Fertigung der entsprechenden Batteriekomponenten zurückzuführen war¹. Diese Problematik wird im aktuellen Stand der Zulassungsprozesse nicht ausreichend berücksichtigt. Aus diesem Grund bietet sich durch die Betrachtung von Produktionsprozessen im Fertigungsprozess die Chance, die Sicherheit von Batteriesystemen zu erhöhen. Der Produktionsprozess der Li-Ionen-Batteriezelle, der in AP 1.3 skizziert wird, besteht aus den drei Teilprozessschritten Elektrodenfertigung, Zellassemblierung sowie Formation & Prüfung². Diese Teilprozessschritte folgen sequentiell aufeinander und setzen sich jeweils aus mehreren Einzelprozessen zusammen (s. Abbildung 2).

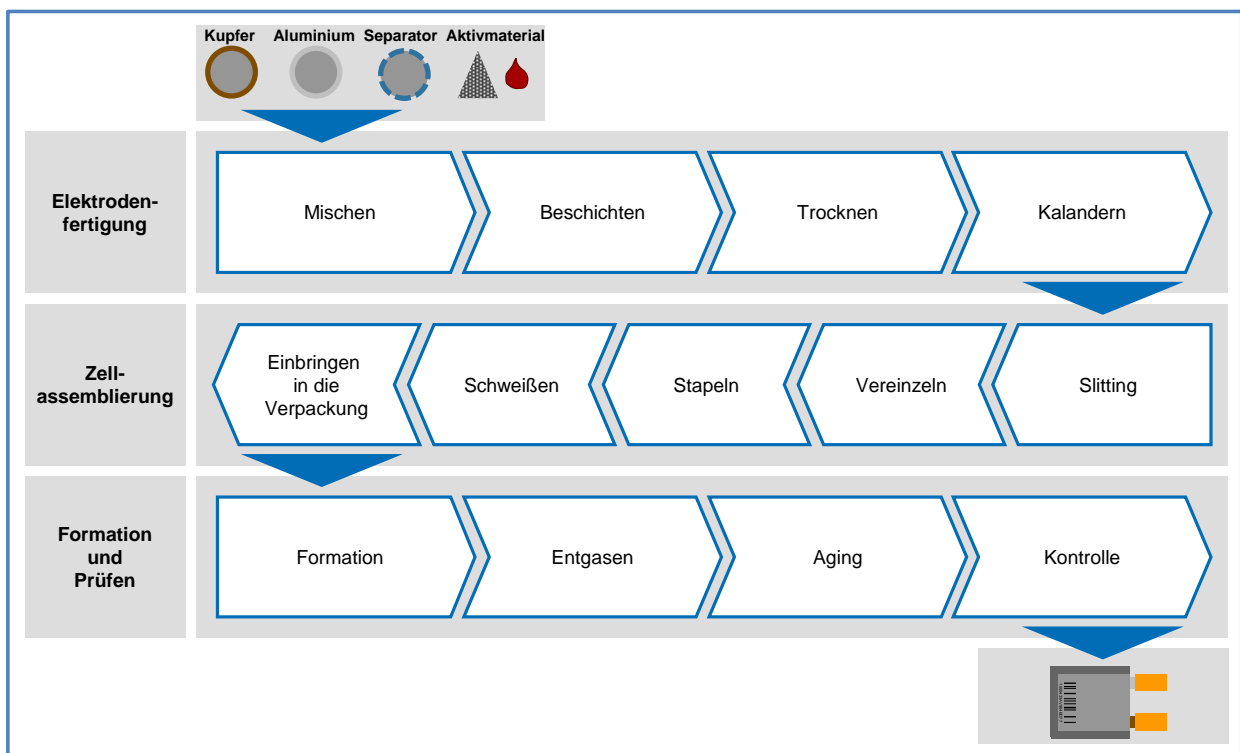


Abbildung 2: Fertigungsprozess einer Li-Ionen-Batteriezelle

Mischen

Beim Mischen werden Aktivmaterialien, leitende Additive, Binder und Lösemittel miteinander vermischt. Das Endprodukt des Mischprozesses sind Beschichtungspasten, die als Slurrys bezeichnet

¹ NetMediaEurope – (<http://www.silicon.de/41633591/>)

² Gulbinska, Lithium-ion Battery Materials and Engineering, Springer, 2014, S.64

werden. In der Regel besteht sowohl der Slurry für die Kathode als auch für die Anode aus vier Komponenten: Aktivmaterial, leitfähiges Additiv, Binder und Lösemittel. Als Aktivmaterial für die Kathode werden Materialien wie z. B. NMC und für die Anode Carbon oder Graphit verwendet. Typische Binder sind u. a. PVDF (Polyvinylidenfluorid), EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk), CMC (Na-Carboxymethylcellulose) und SBR (Styrol-Butadien-Kautschuk). Das Lösemittel ist entweder Wasser oder NMP.

Beschichten

Der Beschichtungsprozess besteht aus dem beidseitigen Auftragen der Slurrys auf die Kupferfolie (Anode) bzw. Aluminiumfolie (Kathode). Die benötigten Kupfer- und Aluminiumfolien werden als Coils angeliefert und via Coil-Coating-Verfahren beschichtet. Diese Methode der Bahnbeschichtung hat sich im Rahmen der Elektrodenfertigung für die Großserie von homogenen, reproduzierbaren und defektfreien Elektroden bei maximaler Kontrolle als geeignet erwiesen.

Trocknen

Während des Trocknungsprozesses wird die durch das Beschichten auf die Elektrodenfolie aufgetragene Paste für die Durchführung der Nachfolgeprozesse getrocknet. Der dabei dominante Trocknungsmechanismus ist die Konvektion. Hierzu wird erwärmte Luft, die die in der Elektrode befindliche Feuchtigkeit (Lösungsmittel oder Wasser) aufnimmt und abtransportiert, über die Oberfläche geblasen. Die Bahngeschwindigkeiten sind sowohl vom Trocknungs- als auch vom Beschichtungsprozess abhängig, da die Trocknungsanlage üblicherweise in die Beschichtungsanlage integriert ist.

Kalandern

In der Elektrodenfertigung ist das Kalandern der Trocknung nachgelagert und dient dazu, die beschichteten Kupfer- und Aluminiumfolien zu komprimieren. Das Komprimieren der Folien ermöglicht die Steigerung der Adhäsion zwischen Beschichtungsmasse und Elektrodenfolie sowie die Zunahme der volumetrischen Energiedichte eine Optimierung der physikalischen und elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden. Dies geschieht durch die Stärkung des Kontakts zwischen den einzelnen Partikeln der Beschichtungsmasse.

Slitting

Das sogenannte Slitting ist der erste Prozessschritt innerhalb der Zellausbaubereitung. Beim Slitting werden die kalandrierten Elektrodenfolien für die Weiterverarbeitung längs ihrer Bewegungsrichtung in schmale Bahnen geschnitten. Dabei wird die Elektrodenfolie von der Abwicklungsrolle durch den Slitter geführt und anschließend wieder aufgewickelt.

Vereinzeln

Der Prozess der Vereinzelnung im Rahmen der Zellausbaubereitung beinhaltet das Ausschneiden bzw. Ausstanzen der einzelnen Elektrodenblätter aus den beschichteten Elektrodenfolien.

Stapeln

Das Stapeln stellt einen der zentralen Prozesse in der Zellausbaubereitung dar und beschreibt das Bilden von aus bis zu 160 Einzelschichten (Anoden-, Kathoden- und Separator-Schichten) bestehenden Zellstapeln. Die Performance des Stapelprozesses sowie die erzielte Qualität werden dabei im Wesentlichen durch die drei Parameter Zykluszeit, Beschädigungen (Anzahl und Art) und Präzision bestimmt. Die innerhalb des Stapelprozesses notwendigen Handhabungsvorgänge können entweder mit Hilfe von Vakuumgreifern oder kontaktlos (Ultraschall) durchgeführt werden.

Schweißen

Der Schweißprozess wird eingesetzt, um die einzelnen Kupfer- und Aluminiumfolien durch das Anbringen von Kontaktfahnen zu verbinden. Kontaktfahnen ermöglichen das Anschließen an andere Zellen (Verbindung zwischen mehreren Zellen), Stromschienen oder elektrochemischen Vorrichtungen und sind Voraussetzung für den späteren Einbau der Zelle in das Batteriepack. Für das Anschweißen der Kontaktfahnen an die Stromableiter stehen grundsätzlich drei verschiedene Verfahren zur Auswahl: Laser-, Widerstands- und Ultraschallschweißen.

Einbringen in die Verpackung

Das Einbringen in die Verpackung ist der finale Prozessschritt im Bereich der Zellausbringung. Das Einbringen in die Verpackung setzt sich aus sechs Teilprozessen zusammen: Tiefziehen der Verpackungsfolie, Einlegen der Bi-Zellen-Stapel, Elektrolytbefüllung, Auflegen der Folienoberseite, Vakuumsiegeln und Zuschneiden.

Formation

Die Formation beschreibt die ersten Ladezyklen einer Batteriezelle. Detailliert betrachtet, bildet sich bei der Formation eine anodenseitige Solid-Elektrolyte-Interface-Schicht (SEI) aus. Die entstehende Deckschicht stabilisiert durch ihre isolierende Wirkung die unkontrollierte weitere Zersetzung des Elektrolyten. Damit sich die SEI-Schicht auf dem Graphit der Anode bilden kann, beginnt der erste Ladezyklus typischerweise mit einer geringen Stromstärke, die in der Folge sukzessive gesteigert wird.

Entgasen

Aufgrund der durch die elektrochemischen Reaktionen des Formationsprozesses gebildeten Gase folgt auf die Formation der Vorgang des Entgasens. Der Entgasungsprozess beginnt mit dem Aufstechen der Gastasche, um das Entweichen der sich dort angesammelten Gase aus der Zelle zu ermöglichen. Anschließend wird die teilgesiegelte Naht zwischen Gastasche und Zelle durch einen finalen und unter Vakuum stattfindenden Siegelvorgang geschlossen. Das Siegeln unter Vakuum führt dabei zu einer Versteifung der Zelle und verhindert dadurch das spätere Verrutschen der Bi-Zellen innerhalb der Verpackung. Am Ende des Entgasungsprozesses wird die Gastasche schließlich von der Zelle abgetrennt und der entstandene Rand gefaltet.

Aging

Der Aging-Prozess besteht aus einem Einlagern der Zellen im Aging-Regal einschließlich einer vorgelagerten und einer nachgelagerten Messung der einzelnen Zellspannungen und Kapazitäten. Die Dauer des Aging-Vorgangs variiert stark und beträgt ungefähr zwei bis vier Wochen. Von besonderer Bedeutung sind die Messungen der Spannungen und Kapazitäten sowohl am Anfang als auch am Ende des Aging-Prozesses. Defekte Zellen werden mittels Vergleich der Messwerte (jeweils vor und nach dem Aging) identifiziert und im Anschluss aussortiert.

Kontrolle

Während der Kontrolle werden die Zellen gereinigt, mit einer Seriennummer versehen und entsprechend ihrer Leistungsdaten sortiert. Die Seriennummer ermöglicht es, die Zelle bei späteren Defekten zu identifizieren und auf diese Weise Rückschlüsse auf deren Fertigungshistorie zu ziehen. Der oben beschriebene Produktionsprozess einer Lithium-Ionen Batteriezelle im Pouch-Format ist nach heutigem Stand der Technik in der industriellen Praxis etabliert. Allerdings liegt der

Fokus der Funktionsprüfung auf dem End-of-Line Test. Fertigungstechnische Risiken werden nur zu einem gewissen Teil abgebildet.

Einzelne Batteriezellen können anschließend zu Batteriemodulen zusammengefügt und mehrere Batteriemodule zu einem Batteriepack integriert werden. Zusätzlich zu den Modulen werden dabei das Batterie-Managementsystem (BMS) zum Überwachen und Steuern der Batterien, das Thermomanagement und die Leistungselektronik der Batterie in das Batteriepack eingebaut. Die folgende Abbildung veranschaulicht diesen Prozess.

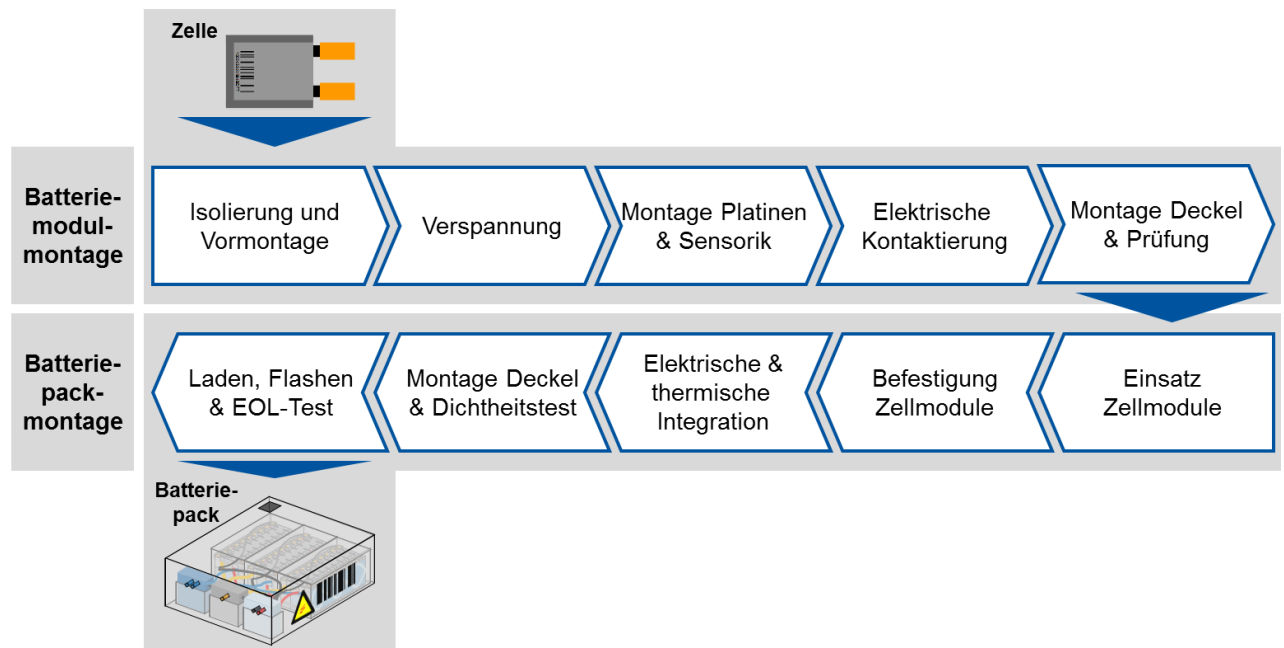


Abbildung 3: Batteriemodul- und Batteriepackmontage

Die Montage eines Batteriemoduls besteht aus fünf sequenziellen Prozessschritten.

Vormontage

Der erste Schritt der Batteriemodulmontage ist die Vormontage. Dabei werden zunächst fehlerhafte Batteriezellen im Rahmen einer Wareneingangsprüfung aussortiert. Anschließend müssen die Oberflächen der Zellen je nach Anlieferzustand gereinigt und/oder aktiviert werden. Zum Fügen der Zellen werden Flüssig- oder Festklebstoffe, klebende Isolationsfolien oder Schaumstoffelemente verwendet. Das Fügemedium muss elektrisch isolierend wirken, um einen internen Kurzschluss zu verhindern. Gängig sind Kleber auf Polyurethan-Basis mit elastomeren Eigenschaften nach dem Aushärten. Die Vormontage endet mit einem definierten Stapeln der Zellen und dem Vermessen dieses Stapels.

Isolierung & Verspannung

Die gestapelten Zellen werden verspannt, um einerseits eine definierte Stapelgeometrie zu erzeugen und andererseits das Ausdehnen und Zusammenziehen (Konvexität bzw. Konkavität) der Zellen während der Be- und Entladung zu minimieren. Platten oder Folien am Boden und an den Seiten des verpressten Moduls dienen dem Wärmeabtransport und der elektrischen Isolation. Die

Verpressung wird durch eine Spannvorrichtung und eine Bandagierung fixiert. Bei der Positionierung der Komponenten am Modul ist eine hohe Genauigkeit erforderlich. Zuletzt wird das Modul verklebt, verschweißt oder verschraubt und in das Gehäuse eingebracht.

Montage Platinen & Sensorik

Das zentrale Kontaktiersystem, bestehend aus diversen Sensoren (Ladung, Spannung, Temperatur), der Platine des BMS-Slaves und der Kontaktiereinheit, wird auf dem Modul platziert. Die Platine wird mittels Schweißen oder Schrauben auf dem Modul befestigt. Die Sensorik wird auf dem Modul montiert und mit der Platine verschweißt (z. B. Ultraschallschweißen). Abschließend erfolgt ein Funktionstest durch Signalüberprüfung und stichprobenartiges Prüfen der Schweißnähte mittels Röntgen- oder Ultraschallmessung.

Elektrische Kontaktierung

Die Verschaltung der Batteriezellen wird durch das elektrische Verbinden der Kontaktfahnen bzw. Ableiter realisiert. Für diesen, als Kontaktierung bezeichneten Prozessschritt, stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- Ultraschallschweißen (geringer Wärmeeintrag)
- Laserschweißen (hohe Präzision)
- Crimpen (einfache Anlagentechnik)
- Schraubverbinden (elektrische Verluste durch Kontaktwiderstände)

Auf Zellebene wird üblicherweise eine serielle Verschaltung realisiert.

Um die Funktionalität der Fügstellen zu gewährleisten, muss deren Leitfähigkeit überprüft werden. Dies geschieht mithilfe von Widerstandsmessungen, Thermokameras o. Ä.. Bei einem hohem Automatisierungsgrad ist die Überprüfung der Schweißnähte schon während des Schweißvorganges durch Laserüberwachung möglich.

Montage Deckel & Prüfung

Zunächst werden diverse Kabel (Spannungs- & COM-Kabel) angebracht und fixiert. Danach wird die Batteriemodulmontage mit der Montage des Deckels und der anschließenden Prüfung abgeschlossen. Die Montage bzw. Fixierung der Schlussplatte erfolgt mittels Schrauben oder Clipsen. Bei einer Modulgesamtspannung von weniger als 60 V besteht kein Hochvoltrisiko.

Das Batteriemodul wird abschließend u. a. auf folgende Funktionen getestet:

- Äußere Unregelmäßigkeiten (optische Toleranzen)
- Ggf. Dichtheit (z. B. Testgas-Leckageprüfung, Überdruckprüfung, Vakuumprüfung)
- Funktionalität der Steuerung und Sensoren (Softwaretest)
- Zellspannung, Zelldifferenz, Kontaktwiderstand
- HV-Festigkeit (Widerstandsmessung)

Die Batteriepackmontage besteht, beginnend mit dem Einsatz der Zellmodule, ebenfalls aus fünf Schritten.

Einsatz Zellmodule

Zunächst werden Kühlplatten im Boden der Batteriepackwanne oder zwischen den einzelnen Modulen montiert. Diese kühlen die Module, die sich im Betrieb stark erwärmen können. Gegebenenfalls ist eine Heizfunktion für den Betrieb im Winter vorzusehen. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass sich das gesamte Batteriepack zu jedem Zeitpunkt in einem optimalen Temperaturbereich befindet. Anschließend werden die einzelnen Batteriemodule mithilfe eines Greifers in das Pack eingesetzt. Die Verschaltung der Module ist stets abhängig vom Anwendungsfall und vom Anbieter. Bei Hochvoltverbindungen ($U > 60 \text{ V}$) müssen geschützte und speziell geschulte Mitarbeiter eingesetzt werden.

Befestigung Zellmodule

Die Batteriemodule werden z. B. mittels Schraubverbindungen an den vorgesehenen Stellen im Batteriepackgehäuse fixiert. Die zusätzliche Verschraubung erhöht die Steifigkeit und sichert das Batteriepack gegen Vibrationen im Betrieb ab. Je nach Aufbau werden Schraubengrößen zwischen M6 und M12 verwendet. Um sicherzustellen, dass sich die Module in der korrekten Position befinden und bei der Montage nicht beschädigt wurden, werden beispielsweise Montagehilfen, Zentrierpins oder eine Kamera eingesetzt. Zuletzt muss eine Verdrehsicherung beim Anziehen der Schrauben berücksichtigt werden.

Elektrische & thermische Integration

Die thermische Integration beinhaltet das Positionieren des Kühlsystems in der dafür vorgesehenen Halterung und das Verbinden mit den Kühlelementen im Packkörper.

Die elektrische Integration beginnt mit dem Aufsetzen und Verschrauben des Hochvolt-moduls. Anschließend wird der Kabelbaum mit den entsprechenden Anschlüssen an den Modulen und den Peripheriegeräten verbunden. Es folgt die Montage und die Verkabelung des BMS Masters zur Steuerung von Kühlsystem und Hochvoltmodul. Abschließend werden die Anschlüsse, Ventile und Stecker am Außengehäuse zur Vorbereitung der Fahrzeugintegration angeschlossen.

Montage Deckel & Dichtheitstest

Bevor der Deckel mit dem restlichen Batteriepackgehäuse verschraubt werden kann, müssen dazwischen Dichtungen (z. B. Gummidichtungen, aufgespritzte oder geklebte Dichtungen) angebracht bzw. aufgetragen werden. Anschließend werden jeweils das Gehäuse und der Kühlkreislauf auf Dichtheit geprüft. Zuletzt wird zur Drucksicherung des Batteriepacks und Sicherheit während des Betriebes eine Berstscheibe montiert.

Laden, Flashen & EOL-Test

Bevor das Batteriepack eingesetzt werden kann, muss es ausgiebig getestet werden. Dafür wird das Batteriemanagementsystem zunächst an einen Computer angeschlossen und mit einem Systemanalyseprogramm sowie der neusten Software „geflasht“. Das Analyseprogramm überprüft

die korrekte Funktion aller Systeme. Des Weiteren wird ein gleichmäßiger Ladezustand aller Batteriezellen hergestellt. Ein thermografisches Messsystem überwacht die Schweißverbindungen und das Thermomanagementsystem während des Betriebes. Weitere Prüfungen umfassen die Elektronik und das BMS etc.. Abschließend werden Label und Warnhinweise aufgeklebt, das Batteriepack als „geprüft“ gekennzeichnet und freigegeben.

Der beschriebene Prozess der Batterieproduktion wurde im Vorhaben detailliert auf der Ebene der Fertigungsparameter und der qualitätsrelevanten Produkteigenschaften analysiert. Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten wurden aufgedeckt und den sicherheitskritischen Produkteigenschaften zugeordnet. Das im Projektkonsortium vorhandene Prozesswissen, das insbesondere von CATL, e.GO Mobile AG und Great Wall Motor Company Ltd. eingebracht wurde, bot eine optimale Ausgangsbasis für die Projektarbeit.

4. Ergebnisse des Forschungsvorhabens StarTest: Aufzählung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

Das erklärte Ziel im Forschungsprojekt StarTest stellt es dar, aus wissenschaftlichen Untersuchungen zu Nutzeranforderungen, Fehlermechanismen und Testmethoden allgemeingültige Prüf- und Zulassungsverfahren für Batterien im deutschen und chinesischen Markt abzuleiten. Im Projektzeitraum konnten alle vordefinierten Aufgabenpakete erfolgreich erforscht und abgeschlossen werden. Die Forschungsergebnisse im Berichtszeitraum lassen sich zusammenfassen:

Arbeitspaket 1.1: Status Quo Analyse des Nutzerverhaltens

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.1.1 (WZL):

- Anforderungsanalyse China & Deutschland: Interviews mit Anwendern & Experten
- Definition spezifischer Nutzerprofile für elektrifizierte Fahrzeugtypen
- Vergleich von Gemeinsamkeiten & Unterschieden zwischen den Nutzerprofilen
- Analyse von Fahrzeugklassen im deutschen und chinesischen Markt
- Identifikation relevanter elektrifizierter Mobilitätslösungen auf Basis der Nutzerprofile
- Konsolidierung der Ergebnisse: Anforderungskatalog für die Batterieauslegung

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.1.2 (PEM):

- Entwicklung einer Batterieanwendung – Benutzermatrix für die Batterieauslegung
- Ableiten von Anforderungen und Spezifikationen für spezifische Batteriesysteme
- Validierung der Auslegungslogik mit assoziierten Projektpartnern: e.GO Mobil AG
- Entwicklung einer Kennzahllogik für die Ermittlung der Belastung der Batteriesysteme
- Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse (Kraftwerk Batterie 2019)

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.2.1 (PEM):

- Identifikation relevanter Normen für den deutschen & chinesischen Markt
- Normenkatalog mit Übersicht für den deutschen & chinesischen Markt
- Klassifikation der Normen nach definierten Kriterien

Arbeitspaket 1.2: Status Quo Analyse Batterie Homologationsverfahren

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.2.2 (PEM):

- Übersicht über Prüfverfahren und Beschreibung von technischen Prüfparametern
- Zuordnung der Parameter zum Normen- und Standardkatalog aus AP 1.2.1
- Auswahl relevanter Prüfungen im Anschluss an Batterie-Missbrauchstests
- Analyse der Prüfstandards hinsichtlich des minimalen Ladezustands
- Dokumentation der Ergebnisse des Arbeitspakets in einer eigens entwickelten Datenbank („NATOM“) für die systematische Analyse von Normen und Standards der Batterieprüfverfahren

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.2.3 (PEM):

- Kategorisierung der Prüfverfahren für die Batterie-Homologation in mechanische, thermische, elektrische und sonstige Prüfverfahren sowie in weitere Untergruppen innerhalb der jeweiligen Testkategorie
- Gegenüberstellung der relevanten Prüfverfahren für die Batterie-Homologation
- Analyse der Auswirkung verschiedener Testparameter und Testabläufe

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.2.4 (PEM):

- Übersicht des organisatorischen Ablaufs bei der EV-Batterie-Homologation
- Kategorisierung der Prüfverfahren und Einordnung spezifischer Prüfabläufe
- Verständnis über verbindlichen und optionalen Verfahren durch die Darstellung und Gegenüberstellung der Zertifizierungsprozesse in Deutschland und China
- Validierung der Ergebnisse des Arbeitspakets 1.2 mit Projektpartnern in China
- Übersicht der Zertifizierungsverfahren für Deutschland und China

Arbeitspaket 1.3: Status Quo Analyse Testverfahren für die Batterieproduktion

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.3.1 (WZL):

- Identifikation kritischer Batterieproduktionsprozesse mit einem Top-Down-Ansatz
- Validierung der Korrektheit der identifizierten Produktionsprozesse durch eine Bottom-up-Untersuchung

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.3.2 (WZL):

- Identifizierung von Branchen mit zertifizierungspflichtigen Fertigungsprozessen
- Übersicht der Verfahren zur Qualitätssicherung für Fertigungsprozesse in den identifizierten Branchen
- Analyse der Qualitätssicherungsverfahren und Bewertung der zertifizierten Prozesse

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.3.3 (WZL):

- Vergleich der in AP 1.3.2 ermittelten Produktionsprozesse mit den Produktionsprozessen in der Batterieproduktion
- Analyse der Übertragbarkeit von Zertifizierungsverfahren auf ermittelte Fertigungsprozesse in die Batterieproduktion
- Ermittlung von Anforderungen an Zertifizierungsprozesse für die Batterieproduktion
-

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.3.4 (WZL):

- Validierung der in AP 1.3.1. herausgearbeiteten sicherheitskritischen Batteriefertigungsprozesse durch Experteninterviews und Besichtigung der Produktionsstätten
- Analyse der lokalen Zertifizierungsverfahren von Batterieproduktionsprozessen durch Besichtigung der Produktionsstätten und Austausch mit chinesischen Behörden aus dem Bereich Zulassung Batterieproduktion
- Dokumentation der Ergebnisse des Arbeitspakets in einer Datenbank

Arbeitspaket 2.1: Entwicklung Testmethode Batterie Homologationsverfahren**Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.1.1 (PEM):**

- Kategorisierung von Nutzerprofilen und Beanspruchungsanforderungen
- Übersicht von Prüfverfahren für sicherheitsrelevante Beanspruchungen
- Definition kritischer Prüfscenarien anhand von etablierten Normen und Standards
- Auswahl von Testfällen für einen einheitlichen und standardisierten Testkatalog

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.1.2 (PEM):

- Überführung von Testtypen aus dem Testkatalog aus Unterarbeitspaket 2.1.1 in zu erzeugende Belastungen und notwendiges Prüfequipment
- Eindeutige Beschreibung und Definition der Testdurchführung und Testabläufe
- Ableitung von Testparametern für die definierten Prüfverfahren:
 - o Analyse von mehr als 49 verschiedenen deutschen und chinesischen Normen zur Genehmigung und Prüfung von Batterien
 - o Vergleich und Auswertung der verschiedenen Prüf- und Testparameter
 - o Ausarbeitung von 18 überarbeiteten Testverfahren inkl. der Testparameter zur weiteren Validierung in Unterarbeitspaket 2.1.4 und 2.1.5
- Definition von allgemeinen Anforderungen an die Prüfumgebung und das Equipment
- Definition von Anforderungen an die Vorkonditionierung des Prüflings
- Identifizierung und Definition von Fail/Pass-Kriterien für die Batteriehomologation

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.1.3 (PEM):

- Analyse der Normen und Testverfahren für die Beschreibung der Prüfabläufe
- Überführung der einzelnen Testverfahren in ein standardisiertes Codierungssystem
- Identifizierung der wesentlichen Merkmale und Konflikte für die effiziente Strukturierung von Prüfabläufen
- Ableitung und Unterteilung der Einflussfaktoren und Zielfunktionen für die Beschreibung von Testabläufen und Testreihenfolgen
- Paarweiser Vergleich und Bewertung der kritischen Einflussfaktoren auf Prüfabläufe
- Ableitung von Prüfabläufen durch Betrachtung der Faktoren Zeitreduktion, Kostenreduktion und Zustand des Prüflings (Beschädigung, Wiederverwendbarkeit)
- Betrachtung der verfügbaren Testinstrumente und Prüfkammern in den Prüflaboren als Einfluss auf Rüst-/Aufbauzeiten für eine effiziente Testreihenfolge

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.1.4 (PEM):

- Harmonisierung aller Prüfparameter und -methoden der aus den vorliegenden Prüfdocuments identifizierten „Charge-Abuse“-Tests in eine umfassende Prüfmethode

- Erwerb von zwei Batteriemodulen auf Basis von 21700-Lithium-Ionen-Rundzellen für die Validierung der harmonisierten Batterietests
- Simulation eines virtuellen Lastprofils zur Validierung (Einsatz des Batteriemoduls innerhalb eines Pedelecs (Tagestour, 51 km))
- Entwicklung einer Prüfmethode zur Validierung und Analyse der Energieeffizienz von Batteriesysteme auf Grundlage technischer Leitdokumente
- Recherchen, Betrachtung und Vergleich von verfügbaren Batteriesystemen (Zelle, Modul) für die Testdurchführung und Validierung der Prüfverfahren

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.1.5 (PEM):

- Durchführung, Auswertung und Analyse des harmonisierten Charge-Abuse-Tests innerhalb des „Battery Abuse Centers“ (BAC) des eLabs des PEM der RWTH Aachen
- Durchführung, Auswertung und Analyse des neuentwickelten Energy-Efficiency-Tests für Batteriesysteme innerhalb des BAC
- Generische Validierung weiterer Prüfmethoden basierend auf insgesamt 29 deutschen und 18 chinesischen Prüfdokumenten
- Ableitung von Modifikationen an bestehenden Prüfvorschriften auf Grundlage der holistischen Analyse aller Prüfdokumente

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.1.6 (PEM):

- Fortführung: Beschreibung eines Ansatzes für die Ausarbeitung eines Normenvorschlags auf Grundlage der Beschreibung von Prüfverfahren und Testabläufen
- Fortführung: Aggregation der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete und Zusammenführung der kondensierten Inhalte für den Normenvorschlag
- Betrachtung und Ausarbeitung von potentiellen Änderungen und Ergänzungen von bestehenden Standards, Normen und Prüfumfängen
- Durchführung von Expertenworkshops zur Ausarbeitung des Normenvorschlags
- Ausformulierung eines harmonisierten Normentwurfs zusammen mit den Mitarbeitern der TÜV Rheinland Consulting GmbH

Arbeitspaket 2.2: Entwicklung Testmethode Batterieproduktion**Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.2.1 (WZL):**

- Erzeugung einer Übersicht für existierende Standards für Qualitätssicherungssysteme
- Analyse der Standards und Auswahl der für die Batterieproduktion verwendbaren Qualitätssicherungsverfahren
- Beschreibung eines geeigneten Qualitätssicherungssystems für die Batterieproduktion

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.2.2 (WZL):

- Definition eines Auditverfahrens für das Qualitätsmanagementsystem innerhalb der Batterieproduktion
- Erstellung eines Audit-Rahmens im Hinblick auf die Prüfgegenstände und Kontrollfragen (Audit-Handbuch)
- Integration der ausgewählten Batterieprüfpunkte in den definierten Auditrahmen

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.2.3 (WZL):

- Validierung des definierten Qualitätsmanagementsystems inklusive Proof of Concept (PoC) für das Audit-Verfahren im eLAB der RWTH Aachen University (Pilotlinie Batterie-zellproduktion)
- Dokumentation der Validierungsergebnisse und -optimierungen
- Durchführung einer quantitativen Audit-Bewertung für weitere Iterationsstufen
- Erstellung eines Audit-Einführungsvideos für die Batteriezellenproduktion zur verständlichen Vermittlung der Auditierungsinhalte

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.2.4 (WZL):

- Fortführung: Aggregation der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete und Zusammenführung der kondensierten Inhalte in einem Normenvorschlag
- Betrachtung und Ausarbeitung von potentiellen Änderungen und Ergänzungen von bestehenden Standards, Normen und Prüfumfängen
- Durchführung von Expertenworkshops zur Ausarbeitung des Normenvorschlags
- Ausformulierung eines harmonisierten Normentwurfs zusammen mit den Mitarbeitern der TÜV Rheinland Consulting GmbH

Detaillierte Ergebnisse inkl. technischer Darstellungen können dem Anhang am Ende des Abschlussberichtes entnommen werden.

5. Fortschritte bei Testmethoden für die Batteriehomologation & Batterieproduktion (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

(Ergebnisse von Seite Dritter, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind (Darstellung der aktuellen Informationsrecherchen nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98))

Bestehende Vorschriften werden zur Anpassung an den technischen Fortschritt fortlaufend weiterentwickelt. Im Falle neuer, sicherheitskritischer Anforderungen oder der Einführung neuer Technologien ist es in Einzelfällen notwendig, neue Vorschriften einzuführen.

Auf chinesischer Seite fand eine aktive Überarbeitung der nationalen Genehmigungsverfahren von Traktionsbatterien für die automobilen Anwendung statt, um dem Entwicklungstrend der Batterietechnologie gerecht zu werden. Im Mai 2020 wurden in diesem Zusammenhang neue, verbindliche National-Normen zur Batteriesicherheit (GB 18384, GB 38031, GB 38032) auf Basis der etablierten Bezugsstandards veröffentlicht. Insbesondere die neu veröffentlichte Norm GB 38031-2020 wird in die aktuelle Betrachtung und Ausarbeitung des standardisierten Normenvorschlags im deutschen und chinesischen Markt aufgenommen, damit aktuelle Entwicklungen im Bereich Batteriesicherheit integriert sowie Entwicklungsaufwände und Kostensenkung der Batteriehomologation berücksichtigt werden können.

Darüber hinaus beschäftigen sich neue Methoden und Simulationsverfahren beispielsweise mit der Simulation spezifischer thermischer Tests wie dem ECE-R100 Feuerstest, bei dem die Batterie einem offenen Feuer mit brennendem Kraftstoff ausgesetzt wird. Dazu wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem das offene Feuer innerhalb der Simulation über einen sogenannten Strahlungssofen dargestellt wird.³ Das Ziel stellt die Reproduktion des thermischen Verhaltens

³ Mirsalehian, M., Beykirch, R. Thermische Betrachtung und physikalische Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien. ATZ Automobiltech Z 122, 2020: P. 38–43

von Batteriesystemen einschließlich Wärmeübertragungsmechanismen wie Leitung, Konvektion und Strahlung sowie Wärmeakkumulation dar. Das Strahlungskonzept ermöglicht Worst-Case-Überlegungen, in denen echtes Feuer stochastisches Verhalten der Flamme selbst zeigen kann. Basierend auf dieser Methode und durch die Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen ist es möglich, potenziell kritische Bereiche der Batterie simulativ zu optimieren und Erkenntnisse in Hinblick auf neue Prüfstandtests zu gewinnen. Zukünftig können über virtuelle Zertifizierungstests die Sicherheit der Passagiere potentiell auch ohne vorhandene Prototypen bereits in der Konzeptphase verbessert und sichergestellt werden.

6. Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

(Insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98))

**Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten
Projektplanänderung**

Es wurden im Rahmen des Forschungsprojektes StarTest keine Schutzrechts- oder Erfindungsanmeldungen gemacht oder in Anspruch genommen.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/ -industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien:

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende stehen im Einklang mit den positiven technisch-wissenschaftlichen Erfolgsaussichten in der Standardisierung von Prüfverfahren für die Genehmigung und Produktion von Batterien in elektrifizierten Mobilitätslösungen. Der frühe und intensive interdisziplinäre Austausch zwischen Forschungseinrichtungen, Batterieproduzenten, OEMs und Anwendern in den ersten Arbeitspaketen hat die Aktualität und Forschungsrelevanz der Projektinhalte für unterschiedliche Industrien aufgezeigt. Es kann auf einen hohen Anwendernutzen über die Wertschöpfungskette „Batterieproduktion & Integration“ geschlossen werden.

Speziell am Automobilstandort Deutschland kommt dem Thema Testverfahren für die Homologation von Fahrzeugbatterien eine wachsende Relevanz zu, was auf stark expandierende Modellpaletten an Elektrofahrzeugen über alle Automobilhersteller zu erklären ist. Auch im chinesischen Markt wächst die wirtschaftliche Bedeutung nach effizient strukturierten und transparenten Normen und Vorschriften zur Batterieproduktion & Integration dieser in elektrifizierte Mobilitätslösungen, welche mit den rapide steigenden Zulassungszahlen im dortigen Marktgefüge begründet sind. Die Bedeutung wurde im Rahmen der Chinareise des StarTest Projektes mit den chinesischen wissenschaftlichen Kollegen gemeinsam reflektiert und als einer der wesentlichen Befähiger für die Entwicklung von neuen elektrischen Mobilitätslösungen ausgemacht.

Die Ergebnisse in Form eines standardisierten Normenvorschlages für die Batterieproduktion können weiter genutzt werden, um Forschungsprojekte in technisch nahe angesiedelten Themenclustern zu

adressieren. Hier bietet sich beispielsweise ein Transfer der Vorgehensmethodik für die Brennstoffzellentechnologie und deren Peripheriekomponenten an, um eine standardisierte Homologation der Elektrofahrzeuge holistisch zu erforschen.

Vor dem Hintergrund einer fortschreitenden Industrialisierung der Brennstoffzellentechnologie erscheint dieses Vorgehen als zielführend, um den Standort Deutschland als Technologievorreiter zu positionieren. Vor dem Hintergrund aktuell steigender Absatzzahlen in der Elektromobilbranche unter hoher Varianz in den existierenden Produktdesigns und länderspezifisch unterschiedlichen Testverfahren wird eine sofortige wirtschaftliche Verwertbarkeit erwartet. Langfristig können durch einen Wissenstransfer auf den Bereich Brennstoffzelle ebenfalls wirtschaftliche Potentiale realisiert werden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen:

Nach Beendigung des Projektes erfolgt eine umfassende wissenschaftliche Ergebnisverwertung durch die beteiligten Partner der RWTH Aachen University. Hier ist von einem Zeithorizont von einem Jahr nach Abschluss des Projekts auszugehen.

Die Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und auf Fachtagungen in Form von Postern und Vorträgen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Neben der rein wissenschaftlichen Kommunikation der Ergebnisse ist eine Publikation in anderweitigen Medien und/oder Fachzeitschriften für Praktiker erfolgt. Beispielsweise hat battery-news.de den Forschungsaufenthalt in China im Rahmen von StarTest berichtet. Weiterhin fließen die wissenschaftlichen Ergebnisse direkt in die Dissertationen der am Projekt beteiligten Wissenschaftler*innen ein und werden damit nach Projektende öffentlich zugänglich.

Neben dem direkten Gewinn an wissenschaftlichen Erkenntnissen wurde das Projekt auch für die Weiterbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses genutzt. Die Ergebnisse werden direkt in den Wissensschatz der Studenten aufgenommen und anschließend gewinnbringend in der Forschung oder Wirtschaft angewandt (z. B. HiWi-Tätigkeiten und Abschlussarbeiten). Die für die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland wichtige Aufgabe der Ausbildung von Experten im Bereich der Batterietechnologie wird durch das geplante Forschungsvorhaben somit gefördert. Zusätzlich ist das Einbringen von Forschungsthemen in regelmäßige Workshops für die Fachöffentlichkeit geplant (z. B. durch Bildungsträger wie dem Haus der Technik). Dieser Transfer und die öffentliche Zugänglichkeit erfolgte bereits während der Projektlaufzeit und wird nach Abschluss des Projekts bis zu drei Jahre andauern, um eine kontinuierliche Wissensvermittlung sicherzustellen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte

Ziel des Forschungsprojekts StarTest ist die Entwicklung einer Norm für die Batterie Zertifizierung und den damit verbundenen Produktionsprozessen. Es soll somit ein Standard geschaffen werden, auf dem andere Forschungs- und Normungsprojekte aufbauen können. Insbesondere kann durch den engen Austausch mit Institutionen, Unternehmen und Forschungseinrichtungen die vorgeschlagene Norm in die nationalen und internationalen Normungs- und Prüfverfahren übertragen werden. Hierbei ist ein Zeithorizont von 1-2 Jahren realistisch.

Neben der Überführung in eine Norm werden die Anforderungen an eine Zertifizierung von Batteriesystemen und deren Produktionsprozesse öffentlich zugänglich und transparent dargestellt. Hierbei können Zell- und Batterieproduzenten und Unternehmen der Elektromobilitätsbranche bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess die Anforderungen ihrer Produkte festlegen und anfallende Designänderungen aufgrund von fehlgeschlagenen Zertifizierungstests vermeiden. Diese Verbesserungen stehen in einem Zeithorizont von weniger als einem Jahr nach der Veröffentlichung zur Verfügung.

Im Anschluss an das Forschungsprojekt StarTest besteht der Ausblick und die Überführung der Erkenntnisse auf zukünftige Batterietechnologien (z.B. All-Solid-State-Batterien). Insbesondere Auswirkungen und mögliche Änderungen auf die Zertifizierung von Batterien und den Aufbau von Prüfstandtests bilden die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für mögliche weitere Entwicklungen.

7. Eingehende Darstellung zu erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes StarTest (Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

Im Berichtszeitraum wurde ein Poster über die Ergebnisse des Arbeitspaket 1.1 auf der Fachtagung Kraftwerk Batterie 2019 präsentiert. Außerdem wurde ein Poster über die Ergebnisse des Arbeitspaket 2.1 auf der International Battery Production Conference 2020 in Braunschweig vorgestellt. Die Erkenntnisse über Zertifizierungsprozesse und die Verbesserungen hinsichtlich eines Testablaufs für Produktionsprozesse wurden weiter in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht und auf internationalen Fachkonferenzen präsentiert. So wurde ein Full-Paper zum Thema “Deep-Dive analysis on communalities and differences of the latest Lithium-Ion battery testing standards and regulations in Germany and China” in 2021 im Journal “Renewable & Sustainable Energy Reviews” eingereicht. Dieses befindet sich aktuell im Review-Prozess.

8. Schlusswort zum Forschungsvorhaben

Das Forschungsvorhaben StarTest konnte einen wesentlichen Beitrag zur Erforschung und Harmonisierung der Testmethoden im Rahmen der Homologation und Produktion von Batterien für elektrifizierte Fahrzeuge für den deutschen und chinesischen Markt leisten. Das Forschungskonsortium bedankt sich für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

9. Anhang: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse des Vorhabens StarTest

Arbeitspaket 1.1: Ist-Analyse Nutzerverhalten

Unterarbeitspaket 1.1.1: Nutzungsszenarien ermitteln (WZL)

Ziel des Arbeitspakets 1.1.1 stellt die Definition von Nutzerprofilen in einem Anforderungskatalog, der die Nutzeranforderungen in den Märkten Deutschland und China möglichst vollumfänglich abbildet, dar. Das Vorgehen zur Ableitung der Nutzerprofile wird in Abbildung 1.1.1 a) gezeigt. Um ein umfassendes Verständnis der Nutzeranforderungen zu erhalten, wurden verschiedene private und kommerzielle Nutzungsszenarien sowie verschiedene Fahrzeugkategorien nach EG-Fahrzeugklassen und der Definition von China berücksichtigt. Insgesamt 28 Nutzungsszenarien für den chinesischen Markt und 30 Nutzungsszenarien für den deutschen Markt wurden mit Hilfe der "Nutzungsszenario-Matrix" identifiziert. Im nächsten Schritt wurden Kennzahlen gebildet, um die Anforderungen der bestimmten Nutzergruppen in Aspekten von Reichweite, Umweltpassungsfähigkeit, Ladebequemlichkeit, Benutzersicherheit, Fahrleistungen, Recycling und weiterer Anforderungen zu beschreiben. Die Nutzeranforderungen des gesamten Lebenszyklus vom Kauf über den täglichen Gebrauch, die Wartung und Reparatur bis zum Ende der Nutzung wurden bei den Forschungsarbeiten berücksichtigt. Daher wurde eine Standard "Nutzerprofilmatrix" eingerichtet, die als Werkzeug zur Quantifizierung der Nutzeranforderungen dient.



Abbildung 1.1.1 a) Vorgehensweise zur Ermittlung der Nutzeranforderungen

Für die Definition von Nutzerprofilen wurden Interviews mit mehr als 10 typischen Elektrofahrzeugnutzern in Deutschland und in China durchgeführt. Die spezifischen Anwendungsfälle bspw. Shared EV und Battery Swapping Mode wurden in China vor Ort recherchiert (vgl. Abb. 1.1.1 b). Die Expertenworkshops mit e.GO Mobile AG und Great Wall Motor Company Ltd. wurden durchgeführt, um die Erfahrungswerte bzgl. des Kundenverhaltens von Fahrzeugherstellern zu sammeln und die erarbeiteten Nutzerprofile zu validieren. Schließlich konnten 50 Benutzeranforderungsprofile für potenzielle Benutzer von Elektrofahrzeugen in China und in Deutschland identifiziert und in der „Nutzerprofilmatrix“ festgelegt werden. Ein Auszug eines Nutzerprofils sowie die Struktur der 'Nutzerprofilmatrix' kann Abbildung 1.1.1 c) entnommen werden.



Abbildung 1.1.1 b) Vor-Ort Recherche in China zur Aufnahme der Nutzeranforderungen

Defined key figures of user demands			Lifecycle of BEV usage						Ref. Vehicle	
Weighting of key figures		Degree of uncertainty		MAX	MIN	Purchase	Daily use	Maintenance & Repair		End of use
Range	1-1 Range at normal temperature of 20 °C (km)	3 - very important	Concrete use cases	250	50	150 to 250	50 to 60			255
	1-2 Range at high temperature of 40 °C (km)	2 - important	Concrete use cases	250	50	150 to 250	50 to 60			160
	1-3 Range at low temperature of -10 °C (km)	2 - important	Estimated	250	55	150 to 250	55 to 70			140
Environmental adaptability	2-1 Operating temperature range (°C)	0 - not relevant	Concrete use cases	70	minus 30		minus 30 to 70			
	2-2 Operating humidity range (%)	0 - not relevant	Concrete use cases	100%	10%		10% to 100%			
	2-3 Operating pressure range (bar)	0 - not relevant	Concrete use cases	1	0.65		0.65 to 1			
Convenience of charge	3-1 Charging method preference	1 - less important	Estimated	0	0	AC&DC	AC&DC			AC
	3-2 AC charging time per 100 km (min)	2 - important	Concrete use cases	150	120	120 to 150	120 to 150			141
	3-3 DC charging time per 100 km (min)	2 - important	Concrete use cases	30	15	15 to 30	15 to 30			null
	3-4 Charging time at low temperature of -10 °C (min)	2 - important	Estimated	45	15	15 to 30	30 to 45			
	3-5 Distances of public charging stations (km)	3 - very important	Derived from ICE	2	0.8	0.8 to 2	0.8 to 2			
Economy	4-1 Battery cost (€/kWh)	3 - very important	Concrete use cases	125	100	100 to 125				
	4-2 Power consumption per 100km (kWh)	3 - very important	Concrete use cases	10	6	6 to 10	6 to 10			8.1
	4-3 Average battery cycle life	3 - very important	Estimated	889	220	275 to 889	275 to 889			800-2000
	4-4 Average battery calendar life (years)	3 - very important	Estimated	8	3.3	3.3 to 8	3.3 to 8			
	4-5 Maintenance & repair costs	2 - important	Estimated	150	120			120-150 (€/60000km)		155 (€/60000km)
Operation environment related to user safety	5-1 Height of excess surface water (cm)	2 - important	Concrete use cases	30	0	0 to 30	0 to 30			
	5-2 Road roughness	1 - less important	Concrete use cases	2	1	1 to 2	1 to 2			
	5-3 Crash safety	2 - important	Estimated	4	4	4				
Driving performance	6-1 Top speed (km/h)	2 - important	Derived from ICE	80	20	60 to 80	20 to 60			100
	6-2 Acceleration time 0-80 km/h (s)	2 - important	Estimated	15	9	9 to 15	9 to 15			17.81
	6-3 Power output fade at low SOC (20%-40%) (%)	1 - less important	Estimated	25	20		20 to 25			
	6-4 Braking distance from 100km/h to 0 (m)	2 - important	Estimated	45	40		40 to 45			
Battery recycling	7-1 Recycling method preference	1 - less important	Concrete use cases	0	0				Decomposition or scrap	
Others	8-1 Gross vehicle mass (kg)	1 - less important	Estimated	900	700	700 - 900				875

Abbildung 1.1.1 c) Exemplarisches Nutzerprofil mit Anforderungsdefinition

Um die kritischen Anforderungen an Elektrofahrzeuge zu ermitteln wurde eine Bewertung hinsichtlich technischer Realisierbarkeit und Gewichtung der Benutzeranforderungen für jedes Nutzerprofil durchgeführt (vgl. Abbildung 1.1.1 d). Für beide Märkte sind Reichweite, Ladezeit, Batteriekosten und Batterie Lebensdauer die Bewertungskriterien mit den höchsten technischen Ansprüchen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Ländern ist der starke Einfluss der chinesischen Subventionspolitik für Elektrofahrzeuge auf die Entscheidungsfindung der Verbraucher. Obwohl der reale Bedarf an einem kleinen Stadttauto im täglichen Einsatz 50 - 60 km beträgt, bevorzugen die Verbraucher und die OEMs eine Reichweite von 150 - 250 km, um die staatlichen zur Verfügung stehenden Subventionen in China zu erhalten. Eine Zusammenfassung der kritischen Nutzeranforderungen für den chinesischen Markt findet sich unter Abbildung 1.1.1 e).

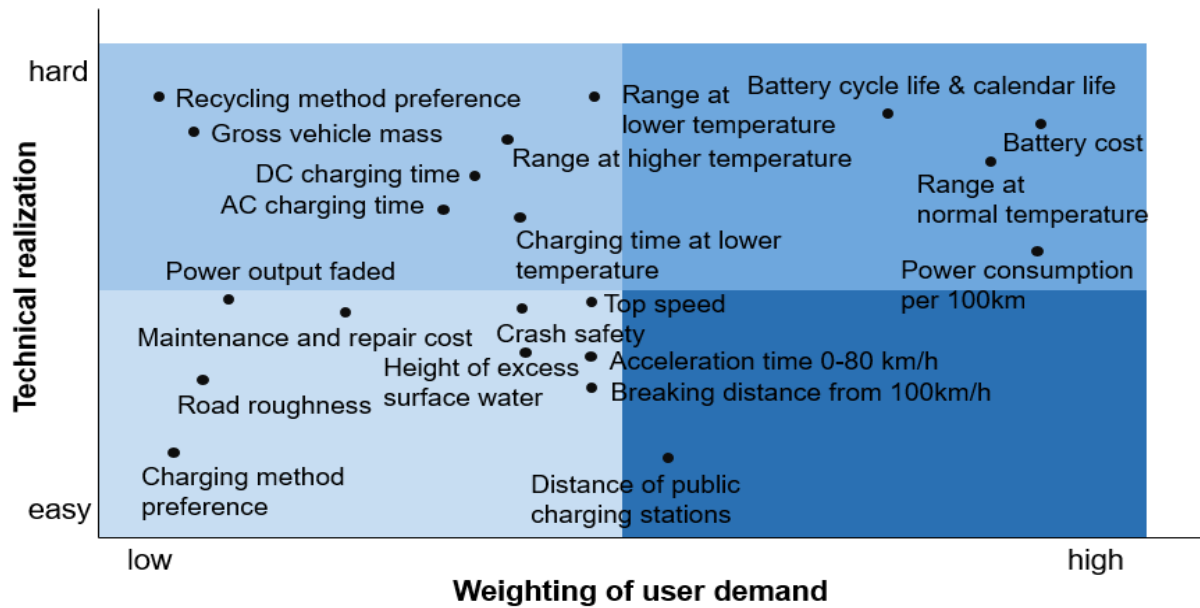


Abbildung 1.1.1 d) Bewertungslogik zur Ermittlung der kritischen Nutzeranforderungen

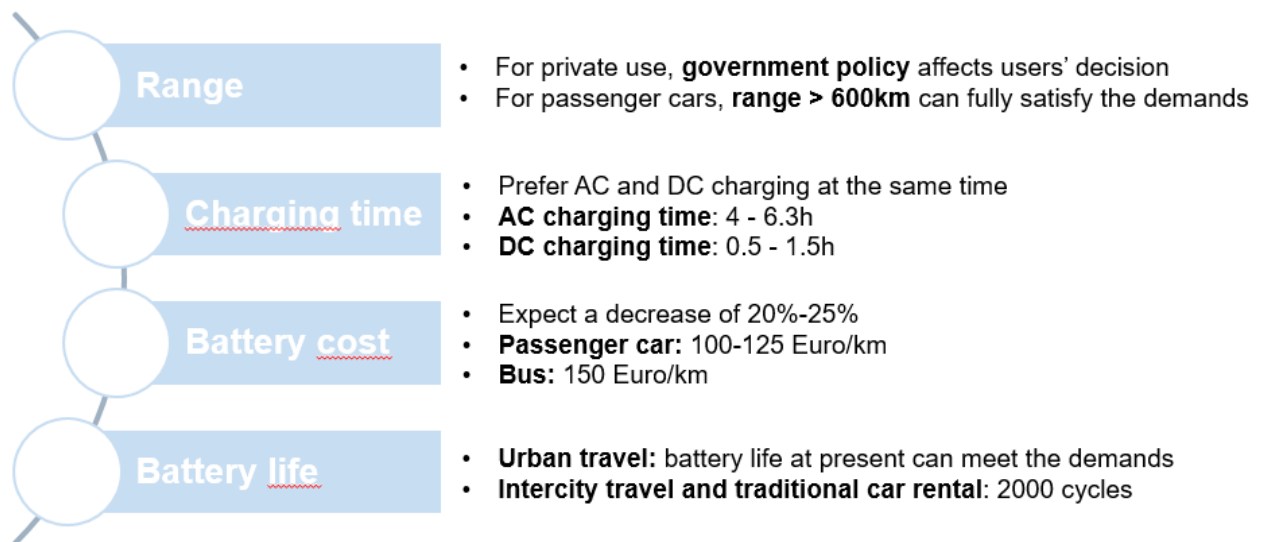


Abbildung 1.1.1 e) Zusammenfassung der kritischen Nutzeranforderungen für den chinesischen Markt

Unterarbeitspaket 1.1.2: Beanspruchung der Batterie ableiten (PEM)

Ziel des Arbeitspakets 1.2 stellt die Ermittlung von Belastungskennwerten eingesetzter Batterien in elektrifizierten Mobilitätslösungen wie bspw. E-Bikes, Pedelecs, zweirädrigen Kraftfahrzeugen, vierrädrigen Kraftfahrzeugen und Fahrzeugen zum Personen- bzw. Gütertransfer dar. Die systematische Herleitung dieser Belastungskennwerte bedingt zunächst die Definition von speziell ausgelegten und dimensionierten Batterien unter Berücksichtigung der jeweiligen spezifischen Nutzerprofile. Dafür wurde jeweils eine Batterieanwendungs-Benutzermatrix für den deutschen und den chinesischen Markt erstellt, welche exemplarisch für Deutschland in Abbildung 1.1.2 a) abgebildet ist. Die Nutzerprofile der Ordinate wurden bereits in AP 1.1.1 durch das WZL für den chinesischen und deutschen Markt definiert. Die Abszisse gibt die unterschiedlichen Fahrzeugklassen nach der EG an. Innerhalb der Matrix konnten relevante Elektromobilitätsprofile ausgemacht werden, die sich für batteriebetriebene Anwendungsfälle anbieten.

Usage profiles of electric vehicles for the German market		Electrified solutions available or market relevant									
		A00	M1		M2		N			L	
Private use	Urban travel	e.GO	P2	P4	P5						
	Suburban travel		P3	P4	P6						
	Intercity travel			P4	P6						
Commercial use	Taxi				P5						
	Ride-hailing service					e.GO					
	Traditional car rental			P4	P6						
	Carsharing	e.GO	P2	P4	P5						
	Bus/shuttle service					P7					
	Coach service						P8				
	Intercity logistics							P9, P10	P9, P10	P8	
	Urban logistics	P2	P2	P4				P9	P10		
Municipal utility							P9	P9			
Battery profile		P1, P2	P2, P3	P4	P5, P6	P7	P8	P9, P10	P9, P10	P8	P11, 12, 13, 14

Abbildung 1.1.2 a) Batterieanwendungs-Benutzermatrix

Für die jeweiligen Elektromobilitätsprofile wurden in einem zweiten Schritt spezifische Batterieprofile konzipiert und hinterlegt. Diese beinhalten eine Spezifikation wesentlicher Batteriekenne- werte über die Ebenen Batteriezelle, Batteriemodul und Batteriesystem. Es konnten für den chi- nesischen und deutschen Markt insgesamt 27 Batterieprofile definiert werden. Die entwickelte generische Spezifikationsliste der Profile findet sich unter Tabelle 1.1.2 b) wieder.

No.	General System Design	Unit	No.	Performance Criteria	Unit
1.1	Dimensions (L x W x H)	mm	2.1	Nominal Voltage	V
1.2	Weight	g	2.2	Voltage Range (MIN/MAX)	V
1.3	Cost	€ /kWh	2.3	Open Circuit Voltage (OCV)	V
1.4	Battery chemistry	-	2.4	Cycle life (80 % SoH)	DIN 43539
1.5	Cell design	DIN 91252	2.5	Calendar Life @ 25 °C	years
1.6	Number of battery cells	No.	2.6	Self discharge @ SOC XX %, 25 °C	% per month
1.7	Number of battery modules	No.	2.7	Maximum capacity	Ah
1.8	Maintainability: Modules	-	2.8	Nominal capacity	Ah
1.9	Material selection	-	2.9	Minimum capacity	Ah
No.	Charging Criteria	Unit	No.	Resistance Criteria	Unit
3.1	Max. constant discharge power	kW @ X C	5.1	Protection class	IP
3.2	Max. constant charge power	kW @ X C	5.2	Humidity	%
3.3	Peak discharge power	kW @ X C	5.3	Vibration	Hz
3.4	Peak charge power	kW @ X C	5.4	Shock	N
3.5	Exchangeability of modules	-	5.5	Crash	N
No.	Thermal Management Criteria	Unit	5.6	Corrosion	-
4.1	Operating Temperature (Min/Max)	°C	5.7	Pressure	Pa
4.2	Required thermal capability	W	5.8	Fire	Sec
4.3	Storage Temperature (Min/Max)	°C	5.9	Stiffness	-
4.4	Charging temperature (Min/Max)	°C	5.10	Penetration	-

Abbildung 1.1.2 b) Spezifikationsliste für Batterieprofile und Belastungen

Ein Auszug eines Batterieprofils kann Abbildung 1.1.2 c) entnommen werden. Die systematische Herangehensweise zur Herleitung der einzelnen Batterieprofile wurde dabei mit der e.GO Mobile AG an einem Nutzerprofil für den deutschen Elektrofahrzeugmarkt validiert, um einen späteren praxistauglichen Anwendungszweck der umfassenden Batterieanwendungs – Benutzermatrix zu gewährleisten.

Profiles	P4
Vehicle c	A
User prof	DE

Cell decision: prismatic cell due to reference calls vehicles (BMW i3) and higher energy contents



No.	Category	Specification	Unit	Cell		Module		Pack	
				MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
1.1	General system design	Dimensions (L x W x H)	mm	173 x 125 x 45	-	600 x 200 x 150	-	1400 x 1000 x 200	-
1.2	General system design	Weight	kg	2	-	16	-	350	-
1.3	General system design	Cost	€ /kWh	< 100(E)	-	< 150	-	< 200	-
1.4	General system design	Battery chemistry	-	NMC / Graphite	NMC / Graphite	NMC / Graphite	NMC / Graphite	NMC / Graphite	NMC / Graphite
1.5	General system design	Cell design	DIN 91	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
1.6	General system design	Number of battery cells	No.	-	-	8	-	80	-
1.7	General system design	Number of battery modules	No.	-	-	-	-	10	-
1.8	General system design	Electrical interconnection (seriell/ parallel connec-	-	-	-	8s1p	-	10s1p	-
1.9	General system design	Exchangeability: Modules	-	-	-	-	-	-	-
1.10	General system design	Gravimetric energy density	Wh/kg	180	-	-	-	-	> 105
1.11	General system design	Material selection	-	Al	Al	Al	Al	Al	Al
2.1	Performance	Nominal Voltage	V	3,68	-	29,44	-	294,4	300
2.2	Performance	Voltage Range (MIN/MAX)	V	4,15	2,7	based on 2.1	based on 2.1	based on 2.1	based on 2.1
2.4	Performance	Cycle life (80 % SoH)	DIN 43	4000	2000	4000	2000	4000	2000

Abbildung 1.1.2 c) Exemplarisches Batterieprofil

Anschließend wurden die 27 spezifizierten Batterieprofile für die unterschiedlichen Anwendungsfälle nach dem auftretenden Belastungsgrad über eine Relativbewertung eingestuft, um die Grenzbereiche der auftretenden Belastungen an der Batterie aufzunehmen. Eine Visualisierung der Bewertungslogik findet sich unter Abbildung 1.1.2 d). Die gewonnenen Spezifikationen und Bewertungen des Arbeitspakets fließen in die Gestaltung der Test- und Prüfvorgänge unter Arbeitspaket 2.2 ein.

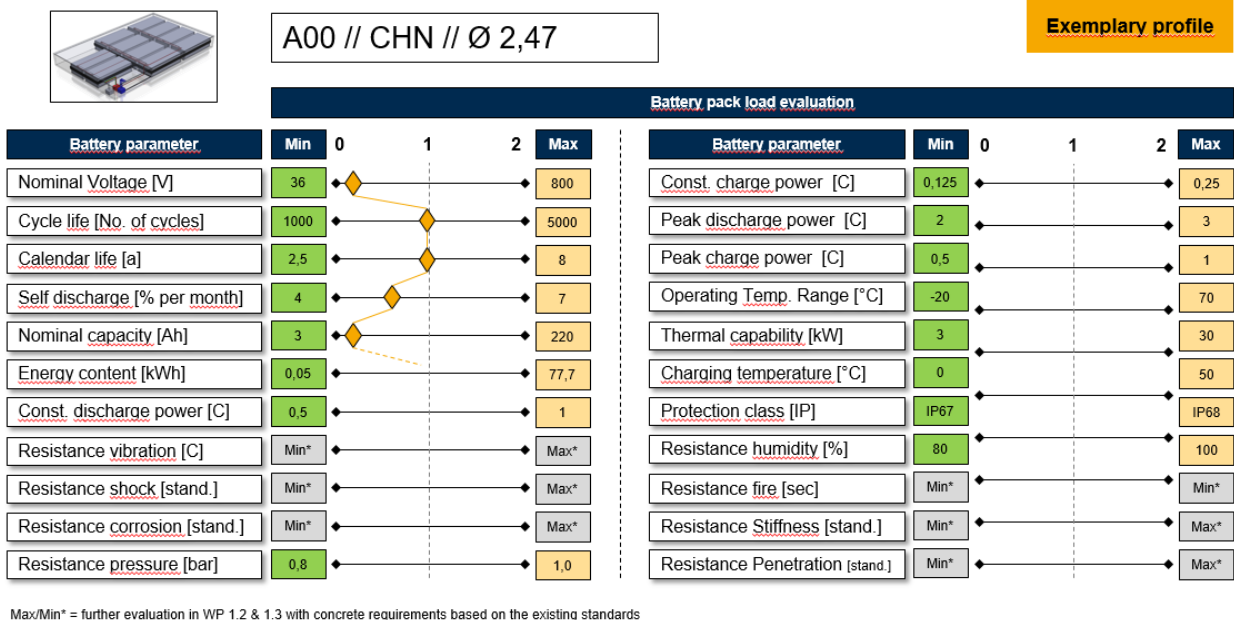


Abbildung 1.1.2 d) Bewertungslogik zur Ermittlung der Batteriebelastungen

Die Ergebnisse wurden in Form eines wissenschaftlichen Posterbeitrages auf der Konferenz „Kraftwerk Batterie“ vom 02.04.2019 bis 04.04.2019 in Aachen vor einem fachvertrauten Publik publiziert, um den wissenschaftlichen Diskurs im Bereich Batteriehomologation anzuregen und Erfahrungen mit angrenzenden Forschungsbereichen zu validieren.

Arbeitspaket 1.2: Ist-Analyse Prüfverfahren Genehmigung

Unterarbeitspaket 1.2.1: Relevante Normen recherchieren (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 1.2.1 stellt die Status Quo Analyse über existierende Normen für die Homologation von Fahrzeugbatterien im chinesischen und deutschen Markt dar. An erster Stelle wurde in diesem Sinn eine umfassende Normenrecherche in den entsprechenden Zielmärkten durchgeführt. In Summe konnten 49 relevante Normen für die Batteriehomologation und korrespondierende Prüfverfahren ermittelt werden. Hierbei fallen 32 Normen unter den deutschen bzw. europäischen Anwenderraum. Für den chinesischen Markt wurden 17 Normen identifiziert. Einen Auszug gibt Abbildung 1.2.1 b).

Die entsprechenden Normen wurden bestellt und zunächst unter verschiedenen Aspekten klassifiziert. Hierunter fallen die Zuordnung der Norm zum Lebenszyklus einer Fahrzeugbatterie, welcher sich auf die Produktion, Homologation, Benutzung und das „Remanufacturing“ bezieht. Eine Einstufung findet sich unter Abbildung 1.2.1 a). Weiter wurde erfasst, ob die Normen auf Batteriezell-, Batteriemodul- oder Batteriesystemebene Anwendung finden. Einen weiteren Klassifikationspunkt stellt die Einteilung der Normen nach ihrem Gültigkeitsstatus dar. Zusätzlich wurden für bereits vorhandene Normen Fail und Pass Kriterien für die jeweiligen Testprozeduren analysiert.

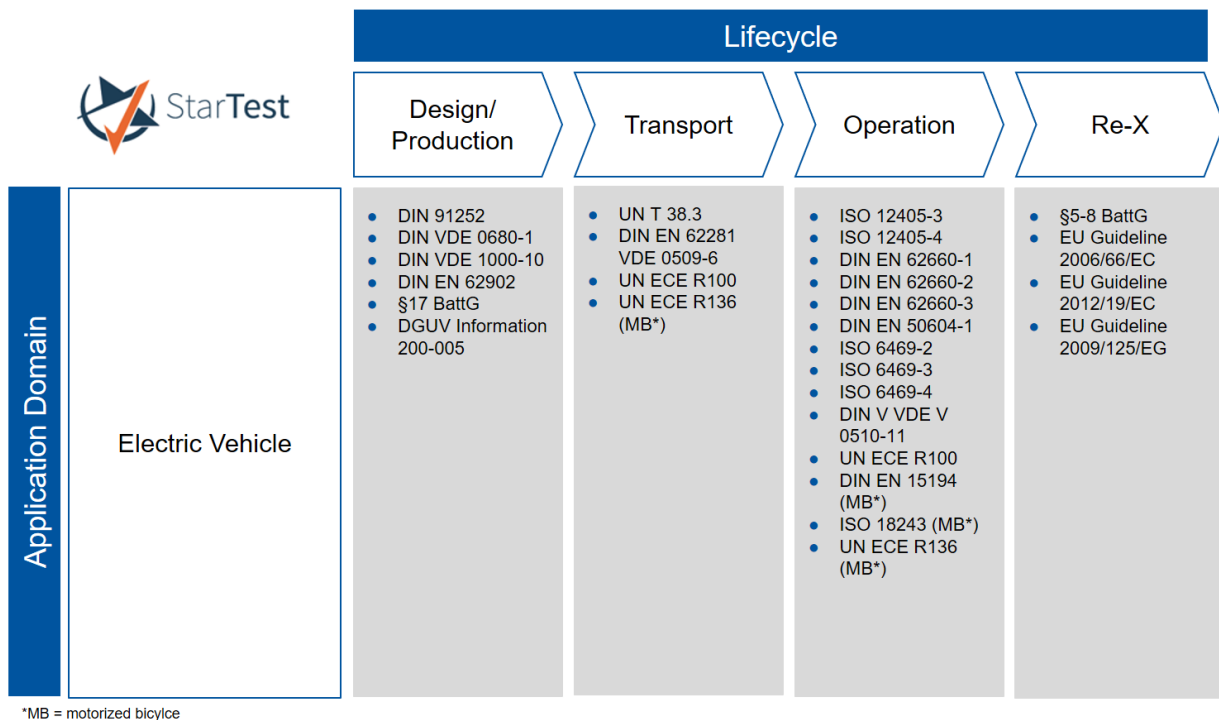


Abbildung 1.2.1 a) Zuordnung deutscher Normen zu den Phasen des Produktlebenszyklus

Research on standards in China and Germany 

N	Country	Code	Domain	Publication I	Validity Status
1	GER	ISO 12405-3:2014-05	Operation	2014-05	Standard, valid
2	GER	ISO 12405-4:2018-07	Operation	2018-07	Standard, valid
3	GER	DIN EN 62660-1:2012-04	Operation	2012-04	Standard, valid
4	GER	DIN EN 62660-1:2017-12	Operation	2017-11	Draft Standard
5	GER	DIN EN 62660-2:2018-02	Operation	2018-01	Draft Standard
6	GER	DIN EN 62660-2:2012-04	Operation	2012-04	Standard, valid
7	GER	DIN EN 62660-3:2017-05	Operation	2017-05	Standard, valid
9	GER	DIN EN ISO 18243:2018-02	Operation	2018-02	Draft Standard
10	GER	ISO 18243:2017-04	Operation	2017-04	Standard, valid
14	GER	DIN EN 50604-1:2017-05	Operation	2017-05	Standard, valid
17	GER	IEC 62133-2:2017	Operation	2017-02	Standard, valid
18	GER	DIN EN 62133-2 VDE 0510-82:2017-11	Operation	2017-11	Standard, valid
19	GER	DIN EN 15194:2018-11	Operation	2018-11	Standard, valid
21	GER	ISO 6469-2:2018	Operation	2018-02	Standard, valid
22	GER	ISO 6469-3:2018	Operation	2018-10	Standard, valid
23	GER	ISO 6469-4:2015-09	Operation	2015-09	Standard, valid
28	GER	DIN V VDE V 0510-11:2008-08	Operation	2008-08	Prestandard
33	CHN	GB/T 31486-2015	Operation	2015-05	Standard, valid
34	CHN	GB/T 31467.1-2015	Operation	2015-05	Standard, valid
35	CHN	GB/T 31467.2-2015	Operation	2015-05	Standard, valid
36	CHN	GB/T 31467.3-2015	Operation	2015-05	Standard, valid
37	CHN	GB/T 31484-2015	Operation	2015-05	Standard, valid
38	CHN	GB/T 31485-2015	Operation	2015-05	Standard, valid
8	GER	DIN 91252:2016-11	Production	2016-11	Standard, valid
24	GER	Battg§ 17 Kennzeichnung	Production	2017-04	Law
25	GER	DIN VDE 0680-1:2013-04	Production	2013-04	Standard, valid
26	GER	DIN VDE 1000-10:2009-01	Production	2009-01	Standard, valid
27	GER	DGUV Information 200-005	Production	2012-04	Rule
29	GER	DIN EN 62902:2018-07	Production	2018-07	Draft Standard
39	CHN	QC/T 840-2010	Production	2010-11	Standard, valid
40	CHN	GB/T 34013-2017	Production	2017-07	Standard, valid
41	CHN	GB/T 34014-2017	Production	2017-07	Standard, valid

Abbildung 1.2.1 b) Auszug aus der umfassenden Normenliste für Deutschland und China

Unterarbeitspaket 1.2.2: Technische Analyse der Prüfverfahren (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 1.2.2 stellt die Ausarbeitung eines umfangreichen Testkatalogs hinsichtlich der aus realen Nutzungen abgeleiteten Beanspruchungen sowie der in Arbeitspaket 1.2 identifizierten Normen und Standards.

Die entsprechenden Normen und Standards wurden zunächst unter verschiedenen Aspekten klassifiziert. Anschließend wurden die identifizierten Testabläufe genauer betrachtet und hinsichtlich der geforderten technischen Parameter beschrieben. Darüber hinaus wurden neben den spezifischen Testparametern auch die vorbereitenden und nachbereitenden Abläufe (Randbedingungen) betrachtet, da gegebenenfalls vor und nach der Testdurchführung ein definierter Standardlade- und -entladezyklus notwendig ist. Dazu gehört auch die Betrachtung von weiteren Funktionsprüfungen und die Frage nach der Aktivierung von Steuerungssystemen (BMS, Kühlsystem, etc. aktiv oder nicht). Weiter wurde erfasst, ob die Normen auf Batteriezell-, Batteriemodul-

oder Batteriesystemebene Anwendung finden. Einen weiteren Klassifikationspunkt stellt die Einteilung der Prüfverfahren nach ihrer Auswirkung auf das Prüfobjekt dar. So werden bei kritischen Prüfverfahren mit hoher Wahrscheinlichkeit das Prüfobjekt zerstört und dieses steht somit nicht mehr für weitere Prüfungen zur Verfügung. Diese Einordnung wurde in Abbildung 1.2.2.a) dargestellt. Zusätzlich wurden für bereits vorhandene Normen Fail und Pass Kriterien für die jeweiligen Testprozeduren analysiert.



Abbildung 1.2.2 a) Zuordnung deutscher Normen zu den Phasen des Produktlebenszyklus

Unterarbeitpaket 1.2.3: Ausarbeiten von Gemeinsamkeiten und Unterschieden (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 1.2.3 stellt die Gegenüberstellung der in den vorhergehenden Arbeitspaketen identifizierten Testverfahren, indem Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufgezeigt werden. Zunächst wurden die im Detail analysierten Normen und Standards verschiedenen Prüfkategorien zu geordnet (z.B. Thermische Zyklusprüfung, Vibrationsprüfung, etc.). Im nächsten Schritt konnten die Zertifizierungsverfahren und betrachteten Belastungen identifiziert und aufgezeigt werden. Dafür werden zunächst die regionalen Gemeinsamkeiten hinsichtlich Deutschland und China bewertet und anschließend der Vergleich zwischen beiden Region gezogen. Insbesondere durch die Darstellung der Unterschiede in den Testparametern der Batterie werden die wesentlichen Belastungsunterschiede festgehalten, um eine Grundlage für die Erarbeitung eines einheitlichen Normenvorschlags für Deutschland und China zu schaffen.

Communalities & Differences: Other Testing

Communalities & Differences: Thermal Testing

Communalities & Differences: Mechanical Testing

Communalities & Differences: Electrical Testing

Test	Testing Protocol regarding German Standards	Testing Protocol regarding Chinese Standards
Water Immersion Altitude Salt spray Thermal Cycling Fire Testing High Temp. Endurance Vibration Shock Drop	Charge Retention Capability Pack/Module/Cell: <i>Internal conformance</i> y ISO 12405-4:2018-07: measure SOC loss after 30 days at 45°C DIN EN 62660-1: measure SOC loss after 42 days/ 28 days at 45°C ISO 18243:2017-04: measure SOC loss after 30 days at 45°C	Charge Retention Capability Pack/Module/Cell: <i>Internal conformance</i> y GB/T 31467.1-2015: measure SOC loss after 30 days at 45°C GB/T 31467.2-2015: measure SOC loss after 30 days at 45°C QC/ 1023-2015: measure SOC loss after 28 days at 25°C ±5°C GB/T 31486-2015: measure SOC loss after 28 days at 45°C
	Start-up Power Pack/Module/Cell: <i>Internal conformance</i> y ISO 12405-4:2018-07: test at -18°C/ 50°C for highest and lowest temperature	Start-up Power Pack/Module/Cell: <i>Internal conformance</i> y GB/T 31467.1-2015: test at -20°C/ 40°C for highest and lowest temperature
	Cycle Life Pack/Module/Cell: <i>Internal conformance</i> ~ ISO 12405-4:2018-08: Charge cycling between 30% and 80% SOC with max discharging current of 15C and max charging current of 20C DIN EN ISO 18243: Charge cycling between 0% and 100% SOC with max discharging & charging current of 1C DIN EN 62660-1	Cycle Life Pack/Module/Cell: <i>Internal conformance</i> y GB/T 31484-2015: Charge cycling between 0% and 100% SOC with max discharging & charging current of 1C

Abbildung 1.2.3 a) Übersicht der Gegenüberstellung der Prüfverfahren für Deutschland und China

Unterarbeitspaket 1.2.4: Analyse der internationalen Zertifizierungsprozesse (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 1.2.4 stellt ergänzend zur technischen Analyse der Prüfverfahren auch die organisatorischen Abläufe und Rahmenbedingungen der Zertifizierungsprozesse in Deutschland und China dar.

Die Gegenüberstellung der Zertifizierungsprozesse in Abbildung 1.2.4.a) gibt einen Einblick in die Unterschiede zwischen den Rahmenbedingungen der Zulassungsverfahren für Deutschland und China. Während in Deutschland der Fokus auf der Zulassung und Genehmigung auf den sicherheitskritischen Aspekten der Batterie liegt, werden in China auch die technischen und organisationalen Prozesse in der Herstellung betrachtet und in Form von Untersuchungsberichten der Fabrik und Fertigungsprozesse dokumentiert. In beiden Regionen werden zur Dokumentation Testprotokolle mit den Ergebnissen der einzelnen Prüfverfahren erstellt und als Grundlage für die Zertifizierung herangezogen. Die Zertifizierung zum Beispiel mit einem Prüfsiegel erfolgt dann durch die örtlichen Institutionen oder Behörden.

Certification process of EV-Batteries in China

Certification process of EV-Batteries in Germany

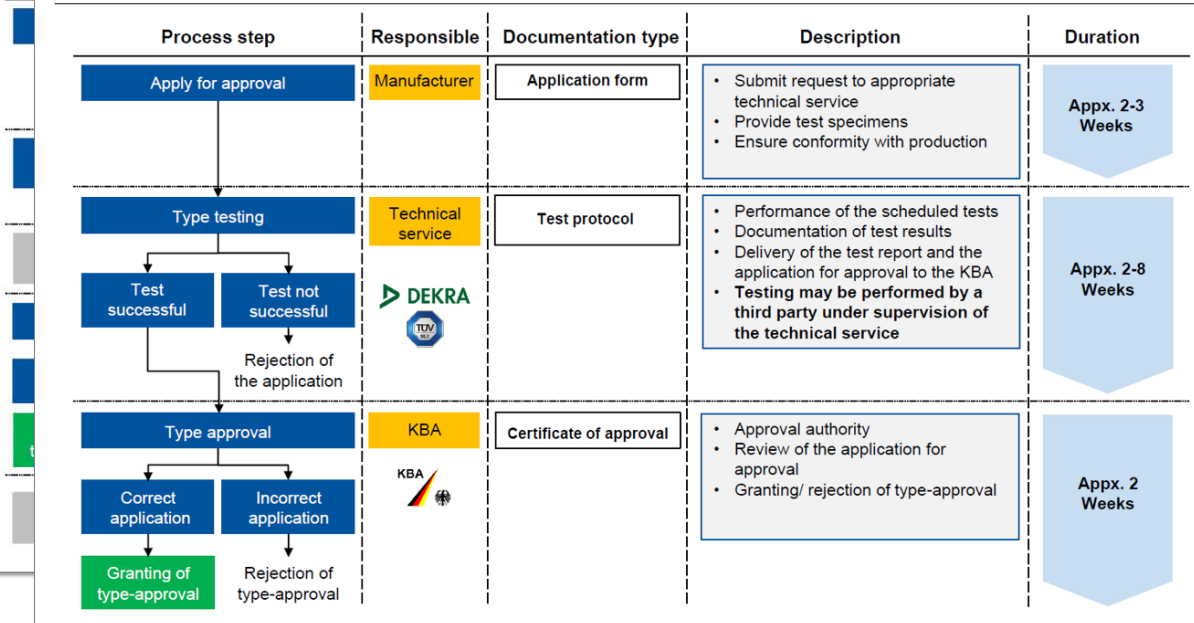


Abbildung 1.2.4 a) Gegenüberstellung der Zertifizierungsprozesse für Batterien für Deutschland und China (hier: Deutschland)

Arbeitspaket 1.3: Ist-Analyse Testverfahren Produktion

Unterarbeitspaket 1.3.1: Recherche von möglichen Fehlerquellen in der Batterieproduktion mit Auswirkungen auf die Produktsicherheit (WZL)

Ziel des Arbeitspakets 1.3.1 ist es, die kritischen Fertigungsprozesse in der bestehenden Batterieproduktion zu identifizieren. Dabei wurden zunächst allgemeine Probleme und Herausforderungen der Batteriezellefertigung und Batteriemontage ermittelt und daraus die Problemherkunft untersucht. Anschließend wurden die notwendigen Prozess- und Qualitätsanforderungen für die Produktionsprozesse definiert.

Die Richtigkeit der identifizierten Fertigungsprozesse wurde im nächsten Schritt durch eine Bottom-Up Untersuchung validiert. Zu diesem Zweck wurden Felddaten der Produktionslinie von Pouch-Zellen im eLab an der RWTH Aachen analysiert und ausgewertet. Die Auswertungsergebnisse wurden durch den Erfahrungsaustausch mit europäischen Batterieherstellern validiert. Eine weitere Vor-Ort-Validierung wird während des Arbeitsaufenthalts in China im Jahr 2019 mit den Projektpartnern CATL und Great Wall Motor vorgenommen.

Zum Abschluss des Unterarbeitspakets wurde ein Katalog von 13 Produktionsprozessen der Batteriezelle und 11 Batteriemontageprozessen erstellt. Ein Auszug des Katalogs zum Beschichtungsprozess der Batteriezelle kann Abbildung 1.3.1 a) entnommen werden.

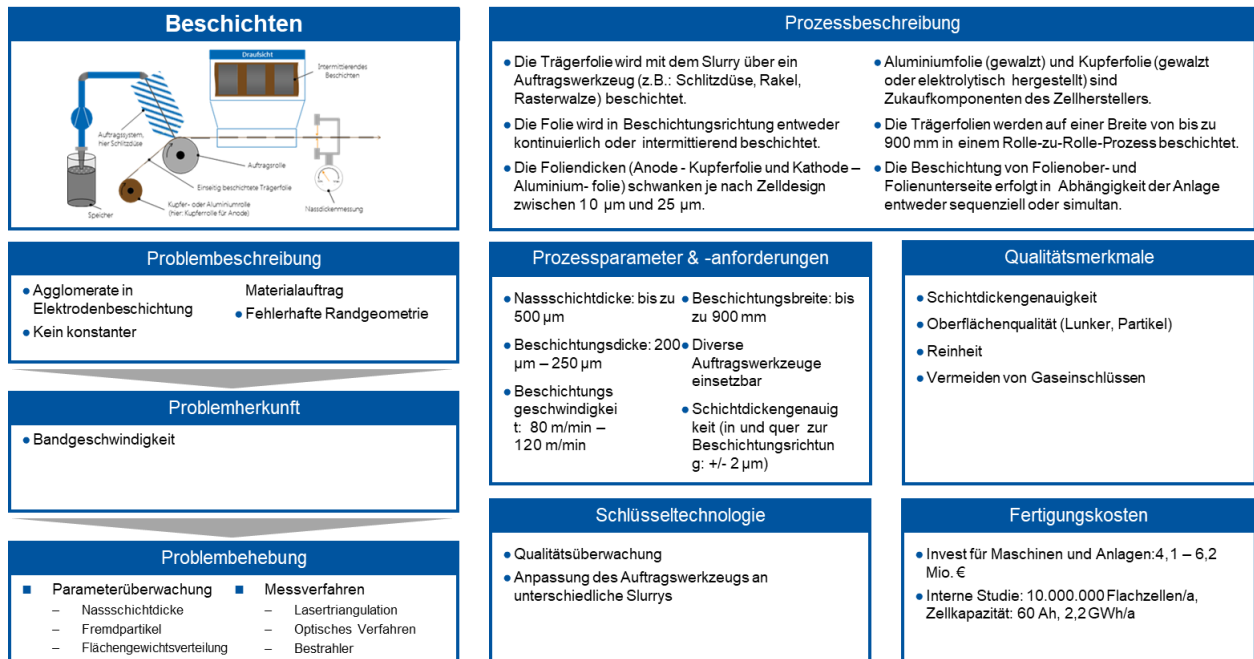


Abbildung 1.3.1 a) Auszug aus Katalog der kritischen Batteriefertigungsprozesse

Unterarbeitspaket 1.3.2: Recherche von zertifizierungspflichtigen Fertigungsprozessen in anderen Branchen (WZL)

Das Ziel des Arbeitspakets 1.3.2 stellt die Erstellung einer umfangreichen Übersicht hinsichtlich Qualitätssicherungsverfahren für Fertigungsprozesse in anderen Branchen dar, damit sich die Zertifizierungsverfahren für die Batterieproduktion an bereits existierenden Verfahren orientieren können.

Im ersten Schritt wurden Branchen mit zertifizierten Fertigungsprozessen identifiziert. Die SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) Normen in der Halbleiterindustrie, die ISO (International Organization for Standardization) Normen und IATF (International Automotive Task Force) Normen in der Automobilindustrie sowie die Nadcap (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program) Auditverfahren in der Luft- und Raumfahrtindustrie wurden aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen an Produktionsprozesse und der weltweit hohen Akzeptanz der Normen eingehend untersucht.

Anschließend wurde der Aufbau der Zertifizierungssysteme in der jeweiligen Branche analysiert. Ein übergreifendes Modell zur Darstellung der zu zertifizierenden Produktionsprozessen wurde aus der Normenanalyse abgeleitet (siehe Abbildung 1.3.2). Es definiert verschiedene Kategorien entlang der gesamten Produktionsprozesskette, die Einfluss auf die Qualitätssicherung haben. Die Zertifizierungsverfahren sowie die Dokumentation in den drei identifizierten Branchen wurden anhand des Modells sortiert und bewertet. Das Modell dient als ein Bewertungsrahmen für das nächste Unterarbeitspaket 1.3.3, um die Übertragbarkeit der ermittelten Zertifizierungsverfahren in die Batterieproduktion zu prüfen.

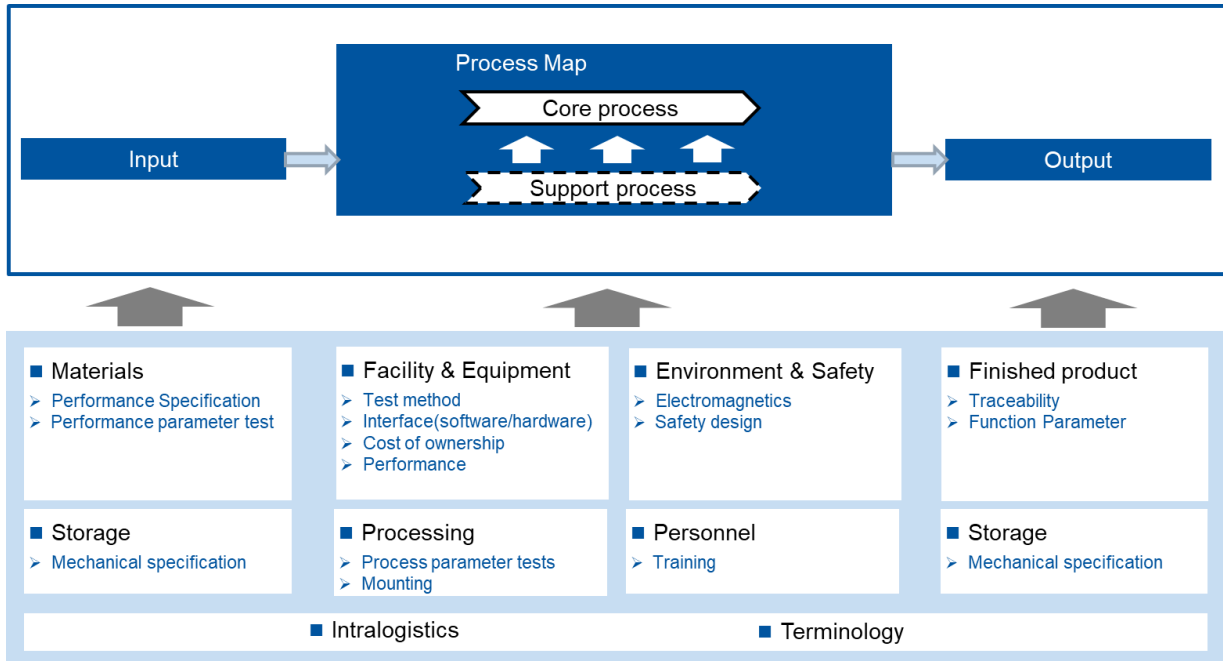


Abbildung 1.3.2 Ein übergreifendes Modell zur Darstellung der zu zertifizierenden Produktionsprozesse

Unterarbeitspaket 1.3.3: Analyse der Zertifizierungsverfahren der ermittelten Fertigungsprozesse (WZL)

Das Ziel des Arbeitspakets 1.3.3 ist es, aufbauend auf den im Unterarbeitspaket 1.3.2 identifizierten zertifizierungspflichtigen Produktionsverfahren und -prozessen, diese auf eine Anwendbarkeit in der Batterieproduktion hin zu untersuchen.

Dazu wurde eine dreistufige Methode entwickelt (siehe Abbildung 1.3.3 a)). Im ersten Schritt wurde die Übertragbarkeit von Zertifizierungsverfahren der Halbleiter, Automobil-, Luft- und Raumfahrtbranche sowie passende Normen anderer Branchen in den vier kritischen Batteriezielproduktionsprozessen und den vier kritischen Batteriemodulmontageprozessen mit vier Abstufungen bewertet. Die untersuchten Batterieproduktionsprozesse wurden in Unterarbeitspaket 1.3.1 mittels Bottom-Up und Top-Down Analyse identifiziert. Im zweiten Schritt wurden die dabei entstandenen Ergebnisse aggregiert, um die Anwendbarkeitsmöglichkeiten der betrachteten Branchen bei der Batterieproduktion zusammenzufassen. Im letzten Schritt wurde die Aggregation nach Prozessen untersucht, die insofern kritisch sind, als dass sie sich nicht durch Normen aus anderen Branchen darstellen lassen und hier bei der in einem späteren Arbeitspaket folgenden Entwicklung des Audits ein besonderes Augenmerk liegen muss.

Comparison of standard systems					Aggregation					Identification of critical categories & process steps				
Industry sectors	Pre-Assembly	Insulation and Tensioning	Electrical Bonding	Sealing & Leak test	Category/Process Step	Pre-Assembly	Insulation and Tensioning	Electrical Bonding	Sealing & Leak test	Category/Process Step	Pre-Assembly	Insulation and Tensioning	Electrical Bonding	Sealing & Leak test
Semiconductor	Overall	Overall	Overall	Overall	Materials	Overall	Overall	Overall	Overall	Materials	Overall	Overall	Overall	Overall
Automotive	Overall	Overall	Overall	Overall	Storage	Overall	Overall	Overall	Overall	Storage	Uncritical	Overall	Overall	Overall
Aerospace	Overall	Overall	Overall	Overall	Facility & Equipment	Overall	Overall	Overall	Overall	Facility & Equipment	Overall	Overall	Overall	Overall
Other	Overall	Overall	Overall	Overall	Processing	Overall	Overall	Overall	Overall	Processing	Critical	Overall	Overall	Overall
					Environment & Safety	Overall	Overall	Overall	Overall	Environment & Safety	Overall	Overall	Overall	Overall
					Personnel	Overall	Overall	Overall	Overall	Personnel	Overall	Overall	Overall	Overall
					Finished product	Overall	Overall	Overall	Overall	Finished product	Critical	Overall	Overall	Overall
					Intralogistics & Terminology	Overall	Overall	Overall	Overall	Intralogistics & Terminology	Uncritical	Overall	Overall	Overall

Abbildung 1.3.3 a) Methodischer Ansatz, um Übertragbarkeit der Zertifizierungsverfahren aus anderen Branchen beurteilen zu können

Auf Seiten der Zellfertigung zeigten sich branchenfremde Normen in den Kategorien Lagerung sowie Intralogistik und Terminologie als besonders übertragbar. Geringe Übereinstimmung konnte dagegen beim Prozess Formation über alle Kategorien hinweg und zusätzlich in den Kategorien Verarbeitung und Ausgangsprodukte gefunden werden. Dies ist in Abbildung 1.3.3 b) auf der linken Hälfte dargestellt.

Bei der Modul- und Packmontage zeigten die Kategorien Verarbeitung und Ausgangsprodukte ebenfalls eine geringe Anwendbarkeit auf. Ähnlich verhielt es sich bei den Kategorien Lagerung sowie Intralogistik und Terminologie, wo die branchenfremden Normen eine hohe Übertragbarkeit suggerieren. Zusätzlich ist ein solches positives Verhalten hier auch bei den übertragbaren Anforderungen an das Personal als dritte Kategorie festzustellen. Dies ist in Abbildung 1.3.3 b) auf der rechten Hälfte dargestellt.

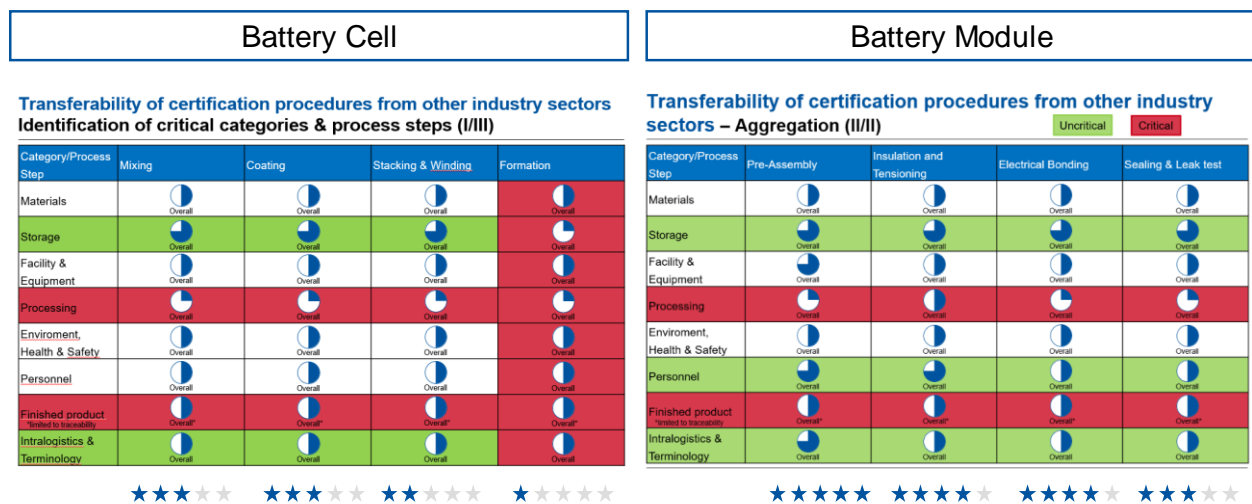


Abbildung 1.3.3 b) Ergebnisse der Übertragbarkeit der Zertifizierungsverfahren aus anderen Branchen in die Batterieproduktion

Die identifizierten weniger geeigneten übertragbaren Kategorien und Prozessen belegen die Bedeutung der späten Arbeitspakete zur standardisierten Normenentwicklung. Ein speziell auf die Prozesse in der Batteriefertigung abgestimmtes Zertifizierungsverfahren wurde für notwendig befunden.

Unterarbeitspaket 1.3.4 Vor-Ort-Recherche in China nach Besonderheiten lokaler Zertifizierungsvorschriften (WZL)

Das Ziel von Unterarbeitspaket 1.3.4 stellt die Validierung der in Unterarbeitspaket 1.3.1 identifizierten sicherheitskritischen Batteriefertigungsprozesse sowie die Analyse der vor Ort bestehenden Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung dar.

Im Rahmen des Forschungsaufenthaltes in China fand diesbezüglich ein fachspezifisches Symposium an der Tsinghua Universität in Peking statt. Das Symposium diente der Präsentation über

aktuelle Projektergebnisse mit den beteiligten Projektpartnern. Schwerpunkt waren der Austausch über den Vergleich von relevanten Standards für die Zulassung von Fahrzeugbatterien sowie die Zertifizierung von korrespondierenden Produktionssystemen und -prozessen. Die Ergebnisse der Diskussion und Vergleiche wurden mit den chinesischen Industriepartnern validiert. Insgesamt fünf chinesische Zell- und Batteriehersteller wurden besucht. Hierzu wurden unter anderem die Produktionsstandorte und Testlabore von Contemporary Amperex Technology Co., Limited (CATL) und Great Wall Motor Company Ltd. besucht und analysiert, um gemeinsam über eine standardisierte Zulassung und Zertifizierung zu beraten.

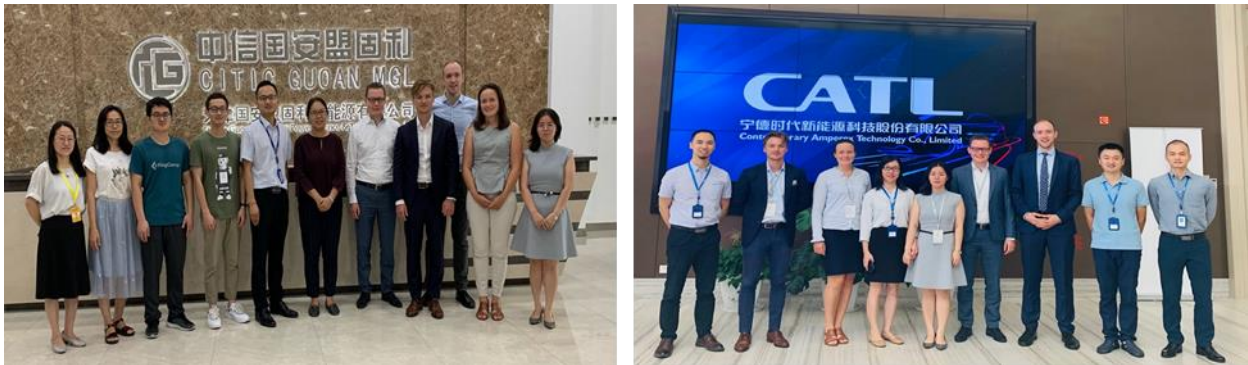
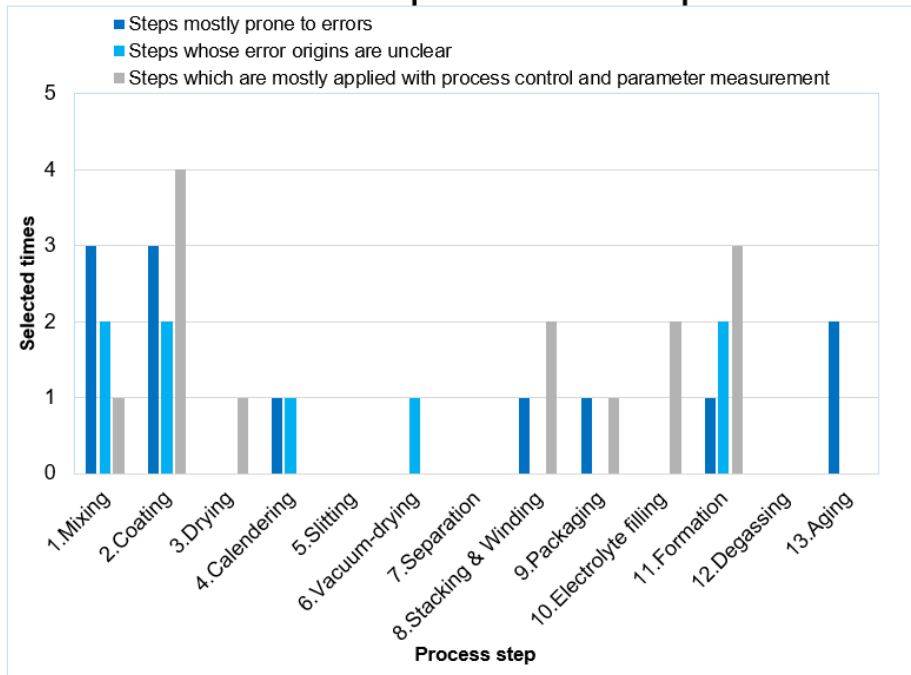


Abbildung 1.3.4 a) Besuch der chinesischen Zellenhersteller MGL und CATL

Die Ergebnisse der Experteninterviews zur Validierung der sicherheitskritischen Batteriefertigungsprozesse finden sich in Abbildung 1.3.4 b) dargestellt. In der Batteriezellproduktion handelt es sich um die vier sicherheitskritischen Prozesse Mischen, Beschichten, Stapeln und Wickeln sowie Formation. In der Batteriemodul- und packmontage wurden die vier Prozesse Vormontage der Batteriezellen, Isolierung und Verspannung, elektrische Kontaktierung sowie das Anbringen der Schlussplatte und der danach erfolgende Dichtheitstest als kritisch identifiziert. Die identifizierten sicherheitskritischen Batteriefertigungsprozesse stimmen mit den Ergebnissen in Unterarbeitspaket 1.3.1 überein.

Ein besonderes Augenmerk bei der Vor-Ort-Recherche in China hat auf der Analyse der lokalen Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Batteriefertigung gelegen. Durch den Austausch mit der chinesischen Behörde wurde uns mitgeteilt, dass die Zertifizierungsvorschriften zur Batteriefertigung in aktiver Entwicklung sind. So wird beispielsweise im Jahr 2020 ein Industriestandard zur Prüfung kritischer Kontrollpunkte bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien veröffentlicht. Weitere Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden durch die Besichtigung der Produktionsstätten aufgenommen. Alle gesammelten Informationen wurden in einer Datenbank (siehe Abbildung 1.3.4 c)) dokumentiert, welche eine umfassende Grundlage für die spätere Entwicklungsphase bildete.

Information returned from experts about LIB cell production



Process step	Sum of selected times
1. Mixing	6
2. Coating	9
3. Drying	1
4. Calendering	2
5. Slitting	0
6. Vacuum-drying	1
7. Separation	0
8. Stacking & Winding	3
9. Packaging	2
10. Electrolyte Filling	2
11. Formation	6
12. Degassing	0
13. Aging	2

Abbildung 1.3.4 b) Validierung der in AP 1.3.1 herausgearbeiteten sicherheitskritischen Batteriefertigungsprozesse durch Experteninterviews (Beispiel: Zellenfertigung)

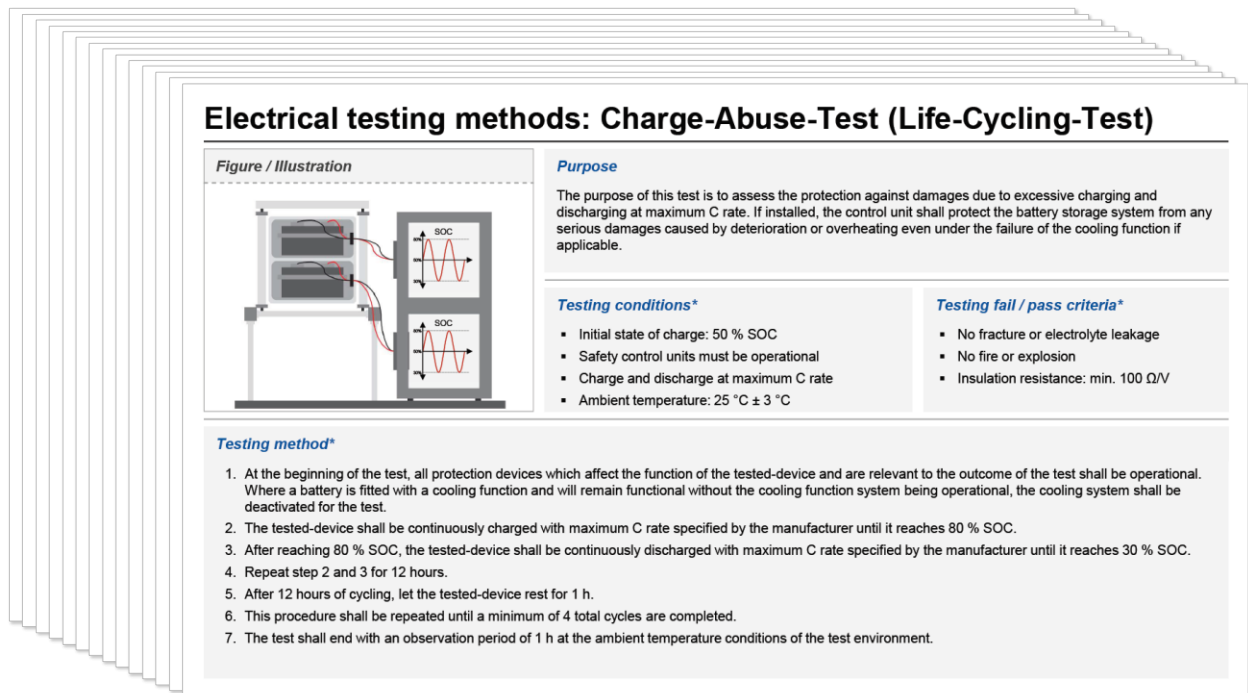
1	Category	Variable	Definition	Testing method	Source
8	Process Parameter	Porosity	Volume fraction of electrolyte		Chinese Association Standard
9	Process Parameter	Pore Diameter	Diameter of the membrane pore	HY/T 051	Chinese Association Standard
10	Process Parameter	Tensile Strength	Maximum tensile stress experienced by the specimen during stretching	GB/T 1040.3	Chinese Association Standard
11	Process Parameter	Heat shrinkage	Shrinkage performance of test piece after heating	GB/T 12027	Chinese Association Standard
12	Process Parameter	Air Permeance	Average flow rate of permeated air per unit area, unit pressure difference and unit time under specified conditions	JIS P8117; Gurley method	Chinese Association Standard
13	Process Parameter	Resistance to Electrolyte Corrosion		Immerser cut diaphragm sample in the electrolyte for lithium ion battery completely at 50 °C, soak for 5 h, take out and wash, and weigh the diaphragm sample after impregnation .	Chinese Association Standard
14	Process Parameter	Appearance Quality		Appearance of the product uses visual inspection	Chinese Association Standard
15	Process Parameter	Moisture Content		GB/T 6283: Karl-fischer method	Chinese Association Standard
16	Process Parameter	Main Chemical Composition			Chinese Association Standard
17	Process Parameter	Insoluble Matter of Oily Binder in N-Methylpyrrolidone (NMP)		In a glove box with relative humidity ≤ 1 ppm, weigh about 2 g of sample, accurate to 0.0001 g, in a 250 mL beaker. Add 80 mL of N-methylpyrrolidone (NMP) to dissolve the sample, and filter it with a glass sand core funnel that has been dried at (110~130) °C and constant weight (the difference between the two weighings must not exceed 0.0003 g). Wash with about 30 mL of NMP in three portions. The insoluble matter and the funnel are placed in an oven at (110 to 130) °C for 60 min, cooled for 40 min, and weighed. They are dried in an oven for 30 min, cooled, and weighed until constant weight. Insoluble content is calculated by mass fraction ω_2 : $\omega_2 = m_2 / m * 100\%$	Chinese Association Standard
18	Process Parameter	Solubility		Use a timer to record the time for the electric mixer to stir until it is completely dissolved	Chinese Association Standard
19	Process Parameter	Viscosity of Solution		Use viscometer to determine viscosity	Chinese Association Standard

Abbildung 1.3.4 c) Auszug aus der Datenbank der lokalen Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Batteriefertigung

Arbeitspaket 2.1: Ist-Analyse Testverfahren Produktion

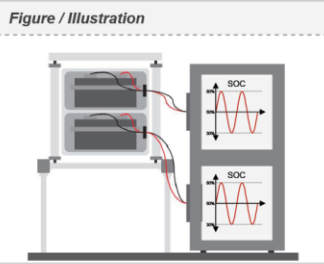
Unterarbeitspaket 2.1.1: Beschreibung von Testverfahren für alle aus der Nutzung der Batterie abgeleiteten sicherheitskritischen Belastungen (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 2.1.1 stellt die Definition der in AP 1.1 identifizierten Beanspruchungen einer Fahrzeugbatterie, die potentiell sicherheitsrelevante Folgen für den Nutzer oder Dritte haben können, dar. Anhand dessen wurden Testverfahren definiert, die die in diesen kritischen Situationen auftretenden Beanspruchungen abbilden. Dafür wurden die in Arbeitspaket 1.2 untersuchten Normen und Standards als Grundlage herangezogen und in Hinblick auf die sicherheitskritischen Beanspruchungen reflektiert. Durch die Einordnung der Prüfungskategorien in AP 1.2.3 konnte bereits in einem ersten Schritt die Bewertung der Testverfahren und Rückführung auf potentielle Nutzungsszenarien erfolgen. Anhand dieser Einordnung wurde ein Testkatalog erstellt, der alle Testfälle für die Genehmigung und Zulassung von Batterien abbildet und definiert. Einen Auszug gibt Abbildung 2.1.1 a).



Electrical testing methods: Charge-Abuse-Test (Life-Cycling-Test)

Figure / Illustration



Purpose

The purpose of this test is to assess the protection against damages due to excessive charging and discharging at maximum C rate. If installed, the control unit shall protect the battery storage system from any serious damages caused by deterioration or overheating even under the failure of the cooling function if applicable.

Testing conditions*

- Initial state of charge: 50 % SOC
- Safety control units must be operational
- Charge and discharge at maximum C rate
- Ambient temperature: 25 °C ± 3 °C

Testing fail / pass criteria*

- No fracture or electrolyte leakage
- No fire or explosion
- Insulation resistance: min. 100 Ω/V

Testing method*

- At the beginning of the test, all protection devices which affect the function of the tested-device and are relevant to the outcome of the test shall be operational. Where a battery is fitted with a cooling function and will remain functional without the cooling function system being operational, the cooling system shall be deactivated for the test.
- The tested-device shall be continuously charged with maximum C rate specified by the manufacturer until it reaches 80 % SOC.
- After reaching 80 % SOC, the tested-device shall be continuously discharged with maximum C rate specified by the manufacturer until it reaches 30 % SOC.
- Repeat step 2 and 3 for 12 hours.
- After 12 hours of cycling, let the tested-device rest for 1 h.
- This procedure shall be repeated until a minimum of 4 total cycles are completed.
- The test shall end with an observation period of 1 h at the ambient temperature conditions of the test environment.

Abbildung 2.1.1 a) Auszug aus dem Testkatalog der spezifischen Prüfverfahren

In diesem Kontext konnten erste Testparameter definiert und Fail/Pass-Kriterien bestimmt werden. Im nächsten Schritt wurden in AP 2.1.2 nun die an der Batterie zu erzeugenden Beanspruchungen in spezifische Parameter für das Prüfequipment überführt sowie Prüfparameter und -kriterien sukzessive detailliert und spezifiziert, um eine hohe Reproduzierbarkeit in den Testabläufen und Testergebnissen zu gewährleisten.

Unterarbeitspaket 2.1.2: Definition von Testparametern und Fail/Pass Kriterien (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 2.1.2 bildet die Ableitung der zu erzeugenden Belastungen und die Definition von Testparametern für das entsprechende Testequipment der definierten Testtypen.

Für die Definition der Testparameter und Fail/Pass Kriterien werden die definierten Testverfahren (aus dem in Unterarbeitspaket 2.1.1 definierten Testkatalog) betrachtet und die zu erzeugenden Belastungen analysiert. Basierend auf den in AP 1.1 abgeleiteten Batterieanforderungen und den in WP 1.2 identifizierten Zertifizierungsrichtlinien wurden über 41 verschiedene Testverfahren aus mehr als 49 verschiedenen deutschen und chinesischen Normen betrachtet. Anhand dieser Betrachtung erfolgt anschließend der umfangreiche Vergleich der verschiedenen Testparameter unter Berücksichtigung der Testdurchführung (vgl. Abbildung 2.1.2 a). In Abhängigkeit von der zu untersuchenden Belastung wird der Mittelwerte, der obere oder der untere Grenzwert als Testparameter gewählt. Die gesammelten Werte werden anschließend verwendet, um die definierten Testparameter in der Validierung zu reflektieren.

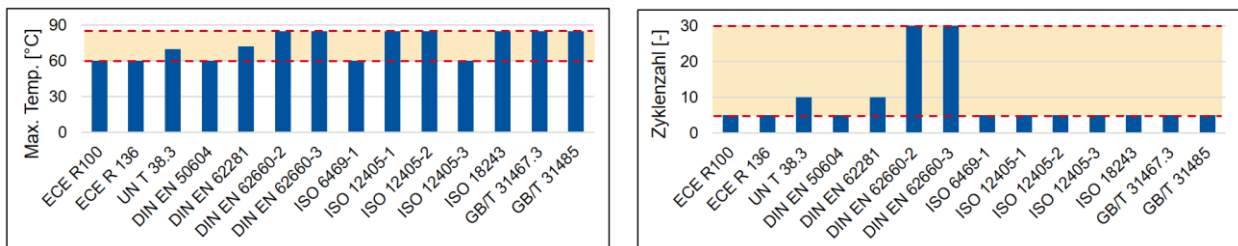


Abbildung 2.1.2 a) Vergleich und Auswertung der verschiedenen Testparameter

Neben der Definition von Testparametern wurden außerdem allgemeine Anforderungen in Form von Toleranzbereichen an die Genauigkeit der externen Messgeräte sowie der einstellbaren oder gemessenen Werte festgelegt, um eine hohe Reproduzierbarkeit und Reduzierung externer Einflüsse zu gewährleisten. Analog zur Definition der Testparameter wurden für die einzelnen Prüfverfahren des Testkatalogs die dazugehörigen Fail-/Pass Kriterien (als Maßstab für das Bestehen und Versagen des Tests) festgelegt. Eine Übersicht der definierten Fail-/Pass Kriterien wird in Abbildung 2.1.2 b dargestellt.

	Mechanisch				Thermisch				Elektrisch				Sonstige					
	Vibration	Mech. Impuls	Mech. Aufprall	Fall	Mech. Integrität	Penetration	Therm. Zyklen	Übertemperatur	Tieftemperatur	Feuchtwärme	Kurzschluss	Überladen	Tiefentladen	Energieeffizienz	Ladungsmissbrauch	Feuerbeständigkeit	Wasserbeständigkeit	Druck
Leckage	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x					x
Bruch / Bersten	x						x	x	x	x	x	x	x		x			x
Feuer / Brand	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
Explosion	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Isolationswiderstand	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x		x			x

Anstelle von Fail/Pass-Kriterien sollte eine Bewertung der Energieeffizienzklasse als **ökologischer Fingerabdruck** vorgenommen werden.

Kriterien für das Versagen des Tests
 Nicht relevant für den Test

Abbildung 2.1.2 b) Zusammenfassung und Definition von Fail/Pass-Kriterien

Im Rahmen der International Battery Production Conference (IBPC) 2020 in Braunschweig konnten die aktuellen Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2.1 einem breiten Publikum in dem Themenfeld der Batterietechnologie vorgestellt werden (vgl. Abbildung 2.1.2 c).

Standardization of Testing Methods for the approval of electric vehicle power batteries for Chinese and European markets

Authors: Achim Kampller*, Heiner Halmes*, Marc Locke*, Henning Davids*, Daniel Nebel*

*Chair of Production Engineering for E-Mobility Components, RWTH Aachen University

Motivation: Homologation of battery systems

As the challenges of climate change and air pollution progress, new drive train technologies are needed as an alternative to combustion engines. To obtain approval for national markets such as China or Germany, the requirements of local approval and legislative institutions must be met. The current procedures for product approval of battery systems for numerous markets are associated with:

- Different test procedures according to the national standards
- Different test versions of very similar test procedures
- Multiple test runs resulting from different product variations
- High costs due to high homologation and testing efforts

Within the research project StarTest an analysis of identified battery testing and certification requirements is conducted. An overview of the identified testing categories for the Chinese and European market is illustrated in figure 1. The test methods can be grouped into four different categories: mechanical, electrical, thermal and other test methods.

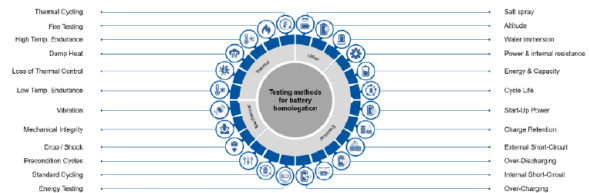


Figure 1 – Overview of testing categories for homologation of battery systems in Chinese and European markets

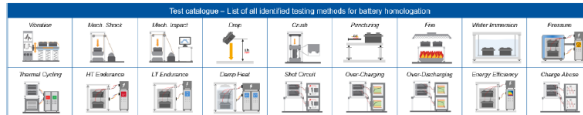


Figure 2 – Test catalogue with identified testing methods for the homologation of battery systems in China & Europe

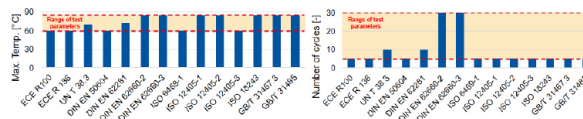


Figure 3 – Exemplary illustration of the parameter ranges for thermal cycling in Chinese and European test standards

Key Results

Based on requirements regarding the safety during the application life cycle and state-of-the-art homologation procedures 41 different test methods in 49 different German and Chinese norms and standards were identified. The identified test methods were analyzed regarding their significance for battery homologation. This resulted in a standard test catalogue (as shown in figure 2).

For the development of the standard test catalog, the following aspects were considered for each test method:

- Preconditioning of the test sample and the environmental conditions as well as allowed tolerances for measurement equipment
- Description of standardized test procedures during test execution
- Comparison of the test execution and respective ranges of test parameters (as shown in Figure 3)
- Definition of critical pass or rather fail criteria that have to be met, in order to ensure the safety during the battery life cycle

Outlook

Based on the conducted research, a test catalog consisting of 38 test procedures for battery homologation has been developed. Moreover an concept for an energy efficiency test for an ecological footprint of electric vehicles and as addition to current air efficiency classes was proposed. During the next work packages in the project StarTest an analysis and differentiation of battery test procedures, followed by the description of a methodological approach for the design of test sequences will be introduced. The proposed test sequence of battery system homologation will be validated in the Battery Abuse Center of RWTH Aachen University. The results of the project StarTest will be incorporated into a norm recommendation for a standardized homologation of battery systems in the Chinese and European market.



Henning Davids, M.Sc.
Research Associate Battery Production
Phone: +49 (0)79 242827
E-Mail: h.davids@iem.rwth-aachen.de



Daniel Nebel, M.Sc.
Research Associate Battery Production
Phone: +49 (0)79 242827
E-Mail: d.nebel@iem.rwth-aachen.de



Abbildung 2.1.2 c) Präsentation der Projektergebnisse auf der IBPC 2020 in Braunschweig

Unterarbeitspaket 2.1.3: Beschreibung des Testablaufes und der Testreihenfolge (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 2.1.3 stellt die Beschreibung des Testablaufes und der Testreihenfolge für die in dem Testkatalog definierten Prüfverfahren dar.

Für die Beschreibung einer definierten Durchführung des gesamten Testprogramms wurden zunächst die aktuell relevanten Normen und Testverfahren für die Batteriehomologation analysiert. Dafür wurden die einzelnen Testverfahren in ein standardisiertes Codierungssystem überführt, um eine systematische Einordnung und Bewertung der Prüfverfahren zu ermöglichen. Die Codierung basiert auf den Attributen Testanwendung, Testtyp, Testkategorie, Testebene und der Testnummer. Anschließend wurden die wesentlichen Merkmale zur Planung einer effizienten Testreihenfolge identifiziert: Zeit (Rüstzeit, Testzeit, Wartezeit), Kosten (Prüfstandkosten, Personalkosten, Kosten für Prüflinge) und Beschädigung (keine, reversible und irreversible Beschädigung). Daraus konnten sich die Zielfunktionen (vgl. Abbildung 2.1.3 a) einer Zeit- und Kostenreduktion durch Kombination verschiedener Prüfverfahren bei einer gleichzeitigen Betrachtung der Beschädigung der verwendeten Prüflinge (vgl. Abbildung 2.1.3 b) adressieren lassen.

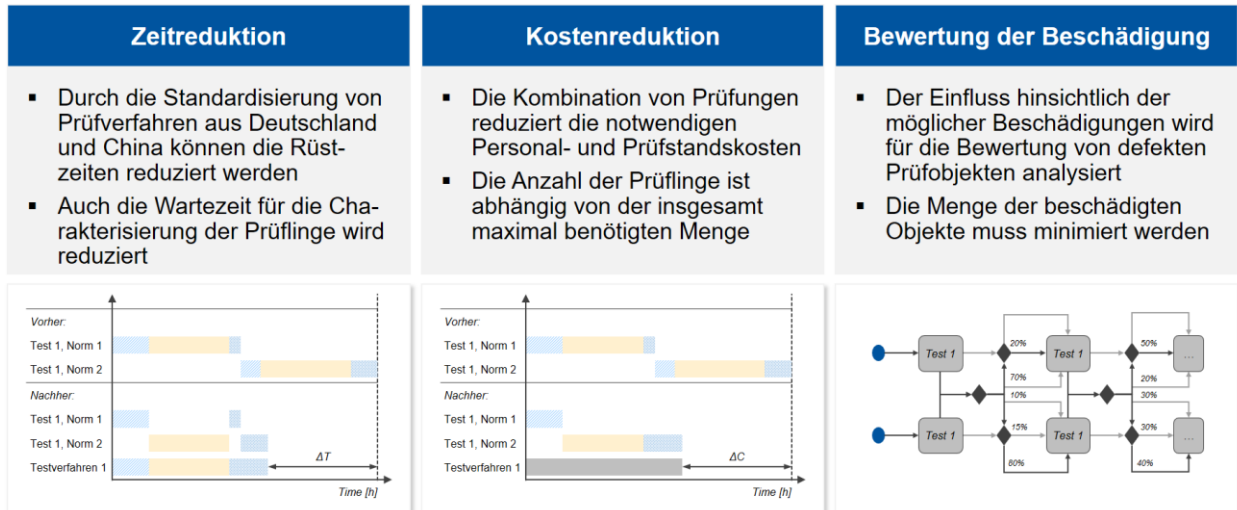


Abbildung 2.1.3 a) Einflussfaktoren und Zielfunktionen auf die Testreihenfolgenbildung

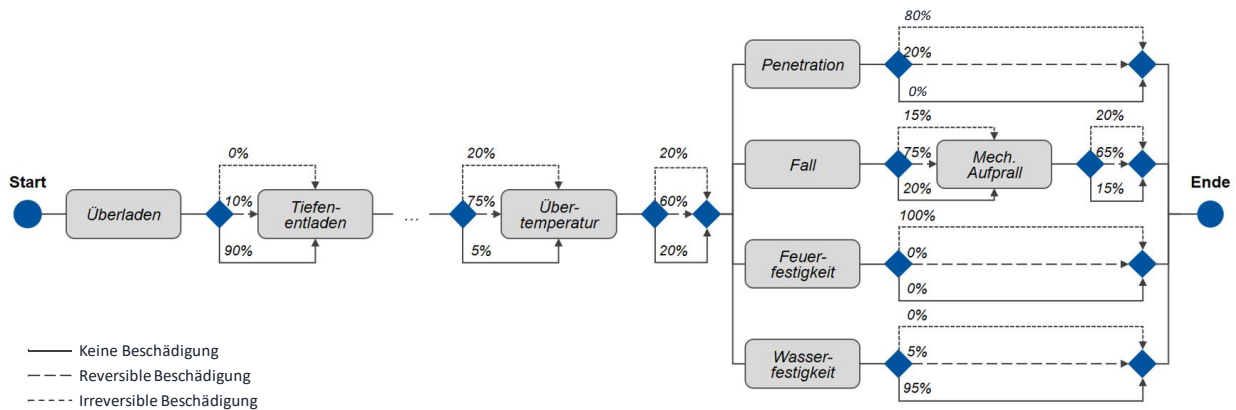


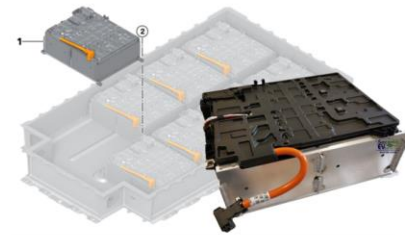
Abbildung 2.1.3 b) Ableitung eines beispielhaften Prüfablaufs durch Bewertung der Beschädigung

Es muss weiter eine gewisse Flexibilität der Testreihenfolge ermöglicht werden, da die verfügbaren Testinstrumente und Prüfkammern je nach Prüflabor variieren und die Reihenfolge einen großen Einfluss auf die Rüstzeiten und somit der effizienten Testreihenfolgenbildung hat.

Unterarbeitspaket 2.1.4: Validierung der Prüfverfahren anhand von Batterietests (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 2.1.4 umfasst die Durchführung von Batterietests zur Validierung der definierten Prüfverfahren und Testparameter des Testkatalogs.

Zur Vorbereitung der Validierung der Prüfverfahren wurde eine umfangreiche Recherche und Betrachtung von verfügbaren Batteriesystemen (Zell- und Modulebene) durchgeführt. Die Gegenüberstellung in Abbildung 2.1.4 a) gibt einen Einblick in die Unterschiede von verschiedenen kommerziell erhältlichen Batteriesystemen. Der in AP 2.1 definierte Testkatalog inklusive der Testparameter und die Testreihenfolge soll durch Durchführung von Homologationsprüfungen validiert werden. Die Testdurchführung fand im Battery Abuse Center (BAC) der RWTH Aachen im Elektromobilitätslabor (eLab) und mit den am Lehrstuhl vorhandenen Prüfmitteln statt. Um die in AP1 identifizierten Nutzungsszenarien hinsichtlich eines geeigneten Validierungsaufwandes abzubilden, wurden für die Validierung der Testverfahren zwei Module (Typ: Batteriemodul 1) ausgewählt.



Einzelzelle	
• Zelltyp:	INR21700-50E (Samsung SDI)
• Anzahl Zellen:	1
• Spannung:	3,6 - 3,7 V
• Max. Spannung:	4,2 V
• Min. Spannung:	2,5 V
• Kapazität:	5 Ah
• Nennstrom:	9,8 A
• Gewicht:	69 ± 1 g

Batteriemodul 1	
• Zelltyp:	NCR18650PF (LiNiMnCoO ₂)
• Anzahl Zellen:	60 Stk.
• Spannung:	36 V
• Max. Spannung:	42 V
• Min. Spannung:	25 – 30 V
• Kapazität:	17,4 Ah
• Nominale Energie:	626,4 Wh
• Gewicht:	5 kg

Batteriemodul 2	
• Zelltyp:	BMW i3 Batteriemodul (Teilnr.: 61277625066)
• Anzahl Zellen:	12 Stk.
• Spannung:	4,6 V
• Max. Spannung:	50,4 V
• Min. Spannung:	39,6 V
• Kapazität:	60 Ah
• Max. Entladestrom:	360 A (10 sec.)
• Gewicht:	28 kg

Abbildung 2.1.4 a) Exemplarische Auswahl von derzeit verfügbaren Batteriesystemen

Für die Validierung der entwickelten Prüfverfahren und harmonisierten Prüfparameter wurden insgesamt zwei Testmethoden angewandt und untersucht. Dabei wurde jedes der erworbenen Batteriemodule jeweils beiden Prüfmethode unterzogen. Abbildung 2.1.4 b) zeigt die generische Beschreibung des harmonisierten Charge-Abuse-Tests. Ziel des Prüfverfahrens war die Bewertung des Schutzes der ausgewählten Batteriemodule vor Schäden durch übermäßiges Laden und Entladen bei maximalen C-Raten.

<p>Darstellung</p>	<p>Absicht</p> <p>Zweck dieser Prüfung ist die Bewertung des Schutzes vor Schäden durch übermäßiges Laden und Entladen bei maximaler C-Rate. Wenn das Steuergerät eingebaut ist, muss es das Batteriespeichersystem vor ernsthaften Schäden durch Verschlechterung oder Überhitzung schützen, auch bei Ausfall der Kühlfunktion, falls vorhanden.</p>
<p>Prüfmethode</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Zu Beginn der Prüfung müssen alle Schutzeinrichtungen, die die Funktion der geprüften Einrichtung beeinflussen und für das Ergebnis der Prüfung von Bedeutung sind, funktionsfähig sein. Ist eine Batterie mit einer Kühlfunktion ausgestattet und bleibt sie auch ohne das Kühlsystem funktionsfähig, so ist das Kühlsystem für die Prüfung zu deaktivieren. 2. Das geprüfte Gerät ist kontinuierlich mit der vom Hersteller angegebenen maximalen C-Rate zu laden, bis es 80 % SOC erreicht. 3. Nach Erreichen von 80 % SOC ist das geprüfte Gerät kontinuierlich mit der vom Hersteller angegebenen maximalen C-Rate zu entladen, bis es 30 % SOC erreicht. 4. Die Schritte 2 und 3 sind 12 Stunden lang zu wiederholen. 5. Nach 12 Stunden Zykluszeit ist das geprüfte Gerät 1 Stunde lang ruhen zu lassen. 6. Dieses Verfahren ist zu wiederholen, bis insgesamt mindestens 4 Zyklen abgeschlossen sind. 7. Die Prüfung wird mit einer Beobachtungszeit von 1 Stunde bei der Umgebungstemperatur der Prüfumgebung abgeschlossen. 	<p>Testbedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anfangszustand der Ladung: 50 % SOC ▪ Sicherheitskontrollgeräte müssen betriebsbereit sein ▪ Ladung und Entladung bei maximaler C-Rate ▪ Umgebungstemperatur: 25 ° C ± 3 ° C <p>Fail / pass-Kriterien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Bruch oder Auslaufen von Elektrolyt ▪ Kein Feuer oder Explosion ▪ Isolationswiderstand: min. 100 Ω/V

Abbildung 2.1.4 b) Charge-Abuse-Test

Abbildung 2.1.4.c) zeigt die generische Beschreibung des Energy-Efficiency-Tests. Ziel des Energieeffizienz-Tests ist es, den Wirkungsgrad der ausgewählten Batteriesysteme anhand eines labbilanzierten Verbrauchsprofils zu ermitteln und zu bewerten. Eine Besonderheit dieses Prüfverfahrens stellt die Tatsache dar, dass es sich bei dieser Prüfmethode um ein neuentwickeltes Prüfverfahren handelt, welches zum gegenwärtigen Zeitpunkt in keinen der untersuchten deutschen und chinesischen Prüfdokumenten abgebildet ist. Als Grundlage für die Entwicklung des Prüfverfahrens wurden Prüfverfahren für elektrische Anlagen anderer Bereiche angepasst und

angewendet. Hierzu gehören unter anderem die durch das deutsche Umwelt Bundesamt (UBA) freigegebenen Prüfdokumente.

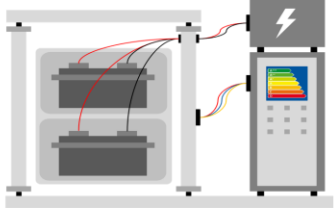
<p>Darstellung</p> 	<p>Absicht</p> <p>Ziel des Energieeffizienz-Tests ist es, die Effizienz eines Batteriesystems anhand eines ladebilanzierten Verbrauchsprofils zu ermitteln. Das Testverfahren dient nicht der Berechnung des tatsächlichen Verbrauchs von Antriebssystemen, sondern als Grundlage für die Bewertung und den Vergleich verschiedener Batteriesysteme.</p>
<p>Testbedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Umgebungstemperatur: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ▪ Die Batterie muss vollständig vorkonditioniert sein 	<p>Fail / pass-Kriterien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anstelle von Fail/Pass-Kriterien muss eine Bewertung der Energieeffizienzklasse (ökologischer Fingerabdruck) vorgenommen werden
<p>Prüfmethode</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Während des Energieeffizienz-Tests wird das folgende Szenario mehrmals wiederholt, um die Effizienz des zu prüfenden Geräts zu ermitteln: <ul style="list-style-type: none"> • Während eines Beschleunigungsvorgangs (z.B. beim Auffahren auf die Autobahn oder bei einem Überholvorgang) fordert der Fahrer die maximale Fahrzeugleistung an (maximale Batterieentladung). • Es folgt eine Fahrphase ohne Batterieleistung ("Gleiten") über einen Zeitraum von 40 s. • Danach wird ein regenerativer Bremsvorgang von 10 s eingeleitet, der zu einer kurzen Aufladung des Batteriesystems führt. 1. Die Ladebilanz während des fiktiven Fahrzyklus muss neutral sein, d.h. die entnommene Kapazität muss genau der aufgeladenen Kapazität entsprechen. 2. Nach mehrmaliger Wiederholung des Testszenarios ist der entsprechende Energie- und Coulomb-Wirkungsgrad des getesteten Gerätes zu berechnen. 	

Abbildung 2.1.4 c) Energy-Efficiency-Test

Unterarbeitspaket 2.1.5: Analyse der Validierungsergebnisse und Anpassung der Testparameter (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 2.1.5 beinhaltet die Analyse und Validierung der aus dem Arbeitspaket 2.1.4 hervorgegangenen Testergebnisse. Die innerhalb des Arbeitspakets generierten Ergebnisse sollen hierbei zu einer Anpassung der Testparameter der jeweiligen Prüfmethode führen welche im anschließenden Arbeitspaket 2.1.6 zusammen mit der TÜV Rheinland Consulting GmbH in einen Normentwurf überführt werden.

Abbildung 2.1.5 a) zeigt beispielhaft das im Rahmen des Charge-Abuse-Test (vgl. Abbildung 2.1.4 b)) simulierte Fahrstreckenprofil eines E-Bikes/Pedelecs. Ziel der Prüfsimulation ist die kontrollierte Überbeanspruchung beider Prüfmodule zur Beobachtung des Systemsverhaltens an den jeweilig vordefinierten Leistungsgrenzen. Das Fahrstreckenprofil simuliert hierbei bewusst den Betrieb unter realen Extrembedingungen. Hierzu gehören beispielsweise hohe Entladeströme in Folge von steilen Berganstiegen bzw. hohe Ladeströme in Folge einer Rekuperation bei steilen Bergabfahrten.

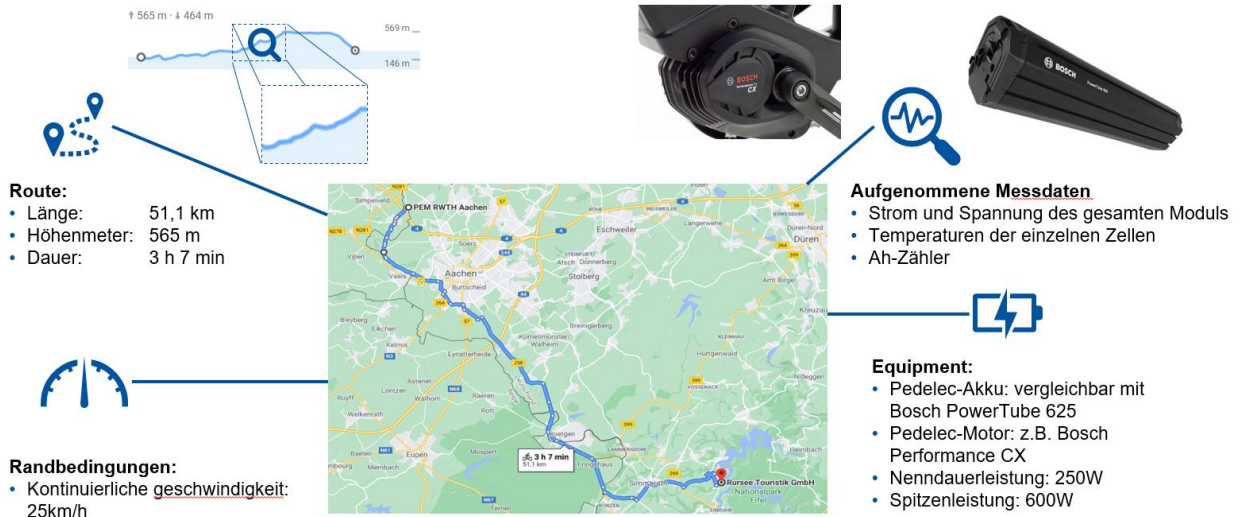


Abbildung 2.1.5 a) Fahrstrecken Simulation (e-Bike/Pedelec) im Rahmen des Charge-Abuse-Tests

Abbildung 2.1.5 b) zeigt die Validierung der Prüfergebnisse des entwickelten Energieeffizienz-Tests beider Prüfmodule. Beide Prüfmodule wiesen hierbei einen (nahezu) identischen Wirkungsgrad von etwa 95 % auf. Der ermittelte Wirkungsgrad für die Bewertung der Energieeffizienz der Energiespeichersysteme auf Lithium-Ionen-Basis wurde dabei aus bestehenden Literaturwerten entnommen. Die bei Lade- und Entladevorgängen ermittelten Energieverluste gehen dabei zu einem Großteil auf die entstehende Prozessabwärme z.B. in Folge von Leitungsverlusten (elektrischer Widerstand) zurück.

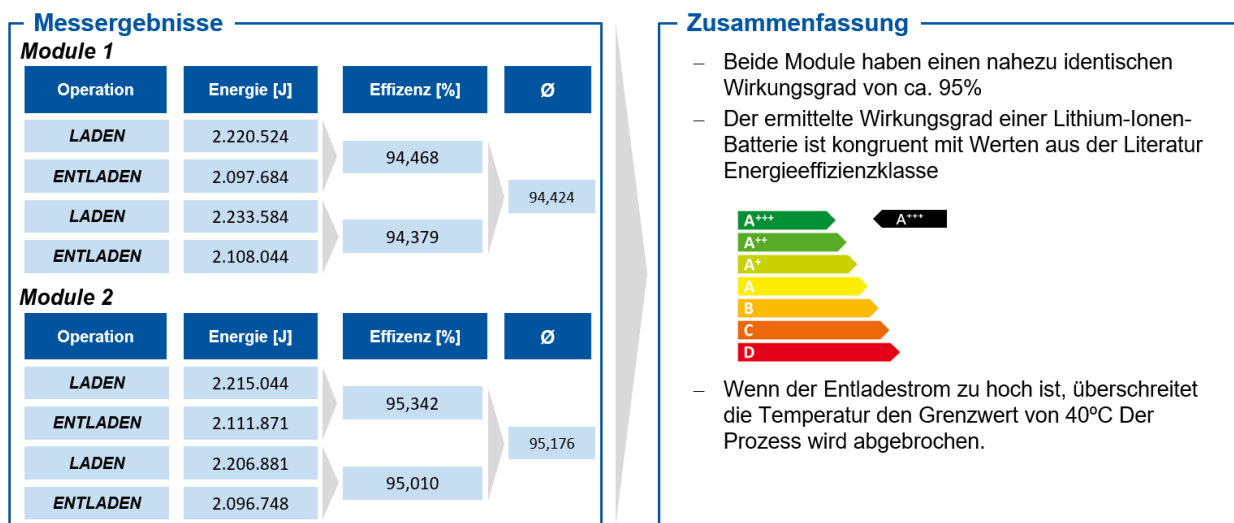


Abbildung 2.1.5 b) Auswertung der Versuchsergebnisse des Energy-Efficiency-Test

Zusätzlich können die gewonnenen Messdaten für einen Vergleich baugleicher Batteriesysteme hinzugezogen werden. So können durch diese Qualitätsunterschiede identifiziert werden und zu einer Verbesserung der Reproduzierbarkeit im Produktionsprozess beitragen. So zeigten beide untersuchten Batteriemodule keine signifikante Abweichung in Hinblick auf ihre Leistungsdaten auf.

Unterarbeitspaket 2.1.6: Überführen der Testbeschreibung in einen Normenvorschlag (PEM)

Das Ziel von Arbeitspaket 2.1.6 beinhaltet die Überführung des Testkatalogs und der gewonnenen Erkenntnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen in einen harmonisierten Norm-Vorschlag.

Für eine systematische Überführung der Projektergebnisse und des Aufbaus des Normentwurfs wurde zunächst ein Ansatz zur Beschreibung der Prüfverfahren, Testabläufe und allgemeinen Anforderungen an die Testdurchführung erarbeitet. Anschließend wurden die Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete aggregiert und als kondensierte Inhalte in einem Normenvorschlag zusammengefasst. Bei der Ausarbeitung des Normenvorschlags wurde auf die beratende Dienstleistung (TÜV Rheinland Consulting GmbH) einer technischen Prüforganisation mit umfangreicher Erfahrung im Bereich Normung zurückgegriffen. Die Abbildung 2.1.6 a) zeigt die abgeschlossenen Arbeitspakete und zeitliche Planung für die gemeinsame Erarbeitung des Normenvorschlags mit dem TÜV Rheinland. In Rahmen der Projektbearbeitung wurden hierzu mehrfach gemeinsame Workshops zur Konsolidierung der Ergebnisse und des Methodenbaukastens durchgeführt.

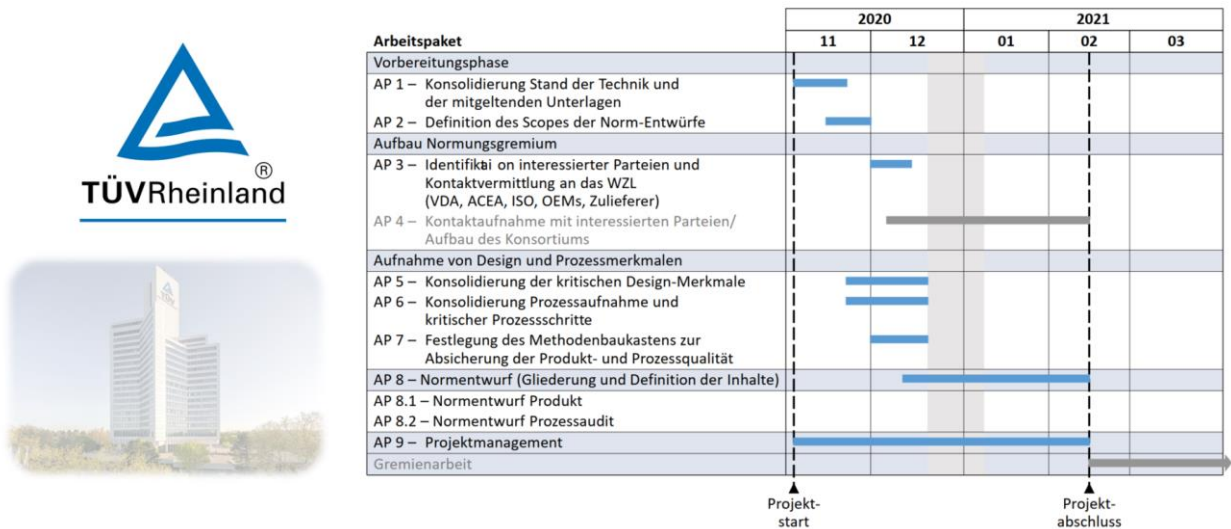


Abbildung 2.1.6 a) Allgemeine Vorgehensweise und zeitliche Planung mit dem TÜV-Rheinland

Zusätzlich zu den identifizierten Prüfverfahren wurden weitere potenzielle Änderungsmaßnahmen an bestehenden Normen abgeleitet, die sich erheblich auf die Sicherheit und Leistung eines Batteriesystems auswirken. Diese zusätzlichen Änderungsmaßnahmen wurden in gemeinsamer Kooperation mit dem TÜV Rheinland Consulting GmbH erarbeitet und erstrecken sich primär auf den methodischen Rahmen, d.h. sie sind universell auf alle Prüfverfahren auszuweiten. Als Beispiel sei hierbei die versuchstechnische Abgrenzung unterschiedlicher Sicherheitseinrichtungen zu benennen. Sollte ein Batteriesystem unter Ausschluss einer Sicherheitseinrichtung (z.B. Kühlfunktion) weiterhin betriebsfähig sein, so sind alle Versuche ohne diese Nebenkompenten auszuführen. Dabei soll sichergestellt werden, dass das Batteriesystem während des Tests der größtmöglichen Real-Last widerfährt. Als weitere Beispiele für Änderungsmaßnahmen seien zudem eine klare Abgrenzung der Systemebenen oder die Kombination verschiedener Prüfverfahren genannt (siehe Abbildung 2.1.6 b)).

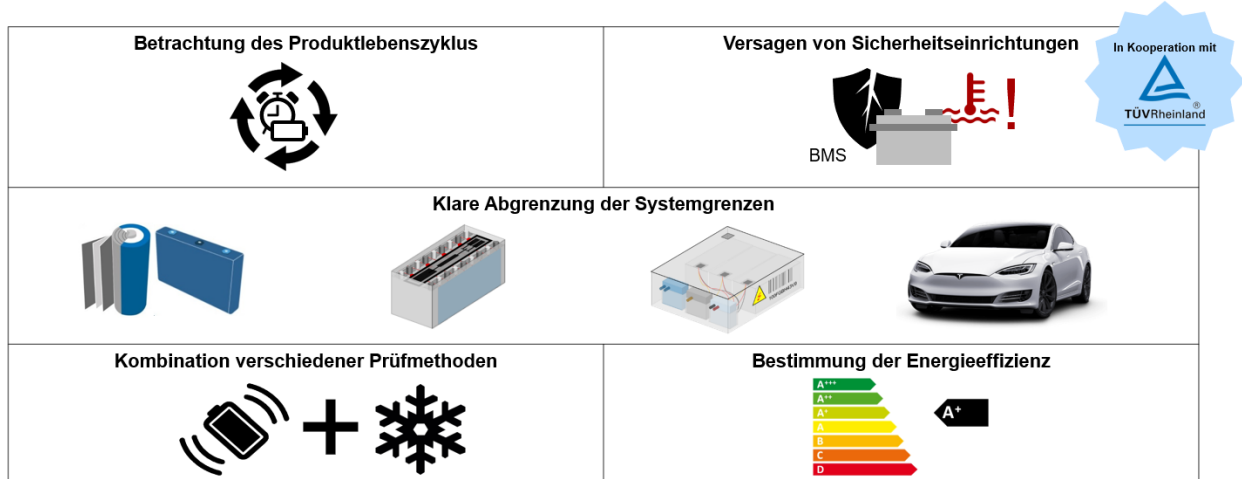


Abbildung 2.1.6 b) Definition allgemeiner Änderungen an bestehenden Normen

Arbeitspaket 2.2: Entwicklung Testverfahren Produktion

Unterarbeitspaket 2.2.1: Beschreibung eines auditierbaren Qualitätssicherungssystems für die Batterieproduktion (WZL)

Unter Berücksichtigung der Industriereife und -relevanz wurden die bestehenden Qualitätsmanagementsysteme in der Automobilindustrie (z.B. IATF 16949:2016 und VDA 6.3) und der Luft- und Raumfahrtindustrie (z.B. Nadcap AC7101/1 REV. GΔ2) untersucht. Da bei der Batterieherstellung hohe Anforderungen an Material und Umwelt gestellt werden, wird auch das Qualitätsmanagementsystem in der pharmazeutischen Industrie (z.B. GMP-Audit für Arzneimittelhersteller) berücksichtigt. Die Qualitätsmanagementsysteme in den genannten Branchen wurden analysiert, damit bei der Entwicklung des Qualitätssicherungssystems möglichst viele Synergien mit bereits existierenden Standards genutzt werden. Der Entwicklungsprozess wird in den folgenden Abschnitten ausführlich beschrieben.

Da die produzierten Batterien in der Automobilindustrie eingesetzt werden sollen, wird vorgeschlagen, das entsprechende Qualitätsmanagementsystem, welches in der Automobilindustrie verwendet wird, zu übernehmen und einige zusätzliche Auditabschnitte zu integrieren, um die Bedingungen der Batterieproduktion besser zu adressieren. Außerdem folgt der VDA im Gegensatz zu anderen Standards, die den Betrieb in verschiedenen Abteilungen evaluieren sollen, dem tatsächlichen Prozess der Umsetzung von Produktionsprojekten, was eine bessere Grundlage für die Integration zusätzlicher Auditabschnitte bietet und daher als Hauptauditstruktur des vorgeschlagenen Qualitätsmanagementsystems für die Batterieproduktion gewählt wurde.

Konkret werden mit der Auditstruktur der VDA 6.3 die hohen Anforderungen an Materialien und Produktionsbedingungen der Batterieproduktion berücksichtigt, sodass auch die folgenden Auditabschnitte enthalten sind:

- Um ein optimales Kalibrierverfahren festzulegen, wird "Section 9: Equipment Calibration and Maintenance" von Nadcap in das vorgeschlagene Qualitätsmanagementsystem integriert (wie Abschnitt 8.6);

- Um eine voll funktionsfähige Qualitätssicherungseinheit zu gewährleisten, werden "Section 1.1: Organizational and Management Responsibilities" und "Section 1.201" der GMP ebenfalls eingearbeitet (als Abschnitt P6);
- Weil die Batterieproduktion Risiken birgt und eine Produktionsumgebung erfordert, die ein bestimmtes Maß an Verunreinigungen nicht überschreiten darf, wird auch ein Teil von "Section 1.4: Plant Safety and Security" und einen Teil von "Section 3.2: Environmental Control Program" der GMP in das vorgeschlagene System integriert (als Abschnitt P7).

Wie in den Abbildungen 2.2.1 a) und 2.2.1 b) dargestellt, sind die aus der VDA 6.3 adaptierten Auditabschnitte blau, die aus anderen Normen adaptierten zusätzlichen Auditabschnitte orange gekennzeichnet. Für die Qualitätsanforderungen an die Materialien werden im GMP-Audit weiterhin detaillierte Kontrollen von Behältern, Stichproben und der Lagerbestandskontrollen durchgeführt, was hingegen in der Batterieproduktion nicht kritisch oder anwendbar ist. Daher wird "Section P5: Supplier Management" aus VDA 6.3 beibehalten. Außerdem wird für die Bewertungsskala, unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit der Anwendung, das vorgeschlagene Qualitätsmanagementsystem für die Batterieproduktion mit "Ja / Nein / NA" angewendet.

P4 Realization of product and process development		Yes / No / NA
4.1	Are the product FMEA / process FMEA created, updated during the project, and are corrective actions set?	
Product		
Process		
4.2	Are the specifications from the plans for product and process development implemented?	
Product		
Process		
4.3	Are the personnel resources available and qualified?	
Product		
Process		
4.4	Is the infrastructure available and suitable?	
Product		
Process		
4.5	Are the required aptitudes and approvals available for the respective phases based on the requirements?	
Product		
Process		
4.6	Are the production control plans used for the respective phases and are production and test documents derived from them?	
Process		
4.7	Is a pre-production (production test) carried out under series conditions for series approval?	
Process		
4.8	Are the planning activities for procurement volumes implemented effectively?	
Product		
Process		
4.9	Is the project transfer to the series for start-up protection regulated?	
Product		
Process		
P5 Supplier management		Yes / No / NA
5.1	Are only approved and quality suppliers used?	
5.2	Are the customer requirements in the supply chain taken into account?	
5.3	Have target agreements for the delivery service been agreed and implemented with the suppliers?	
5.4	Are the required shares available for the purchased quantities?	
5.5	Is the agreed quality of the procurement scope guaranteed?	
5.6	Are the goods receipts properly stored?	
5.7	Is the staff qualified for the respective tasks and are the responsibilities defined?	
P6 Quality management		Yes / No / NA
6.1	Does this facility/business unit operate under a facility or corporate quality policy?	
6.2	Does a Quality Assurance unit (department) exist as a separate organizational entity?	
6.3	Does the Quality Assurance unit alone have both the authority and responsibility to approve or reject all components, drug product containers and closures, in-process materials, packaging materials, labeling and drug products?	
6.4	Does the Quality Assurance department or unit routinely review production records to ensure that procedures were followed and properly documented?	
6.5	Are adequate laboratory space, equipment, and qualified personnel available for required testing?	
6.6	If any portion of testing is performed by a contractor, has the Quality Assurance unit inspected the contractor's site and verified that the laboratory space, equipment, qualified personnel and procedures are adequate?	
6.7	Date of last inspection: _____	
6.8	Are all Quality Assurance procedures in writing?	
6.9	Are all Quality Assurance responsibilities in writing?	
6.10	Are all written Quality Assurance procedures current and approved?	
6.11	Are the procedures followed?	
6.12	Are Quality Assurance supervisory personnel qualified by way of training and experience?	
6.13	Are other Quality Assurance personnel, e.g., chemists, analysts, laboratory technicians) qualified by way of training and experience?	
6.14	Does the Quality Assurance unit have a person or department specifically charged with the responsibility of designing, revising, and obtaining approval for production and testing procedures, forms, and records?	

Abbildung 2.2.1 a) Auszug aus dem vorgeschlagenen Qualitätsmanagementsystem für die Batterieproduktion (Teil 1)

P8 Process analysis / Production		Yes / No / NA
8.1	What goes into the process? (Process input)	
8.1.1	Did the project transfer from development to series production take place?	
8.1.2	Are the required quantities / production lot sizes of the materials available at the agreed time at the correct storage location / workplace?	
8.1.3	Are the materials properly stored and are the means of transport / packaging matched to the specific characteristics of the materials?	
8.1.4	Are the required markings / records / releases available and assigned to the materials?	
8.1.5	Are changes to the product or process tracked and documented during the series?	
8.2	Work content / process flow (Are all production processes regulated?)	
8.2.1	Are the relevant details completely listed on the basis of the production control plan in the production and test documents?	
8.2.2	Is a release of production processes and adjustment data recorded?	
8.2.3	Can the product-specific requirements for the customer be achieved with the production facilities?	
8.2.4	Are special features controlled in production?	
8.2.5	Are rejects, reworking and set-up parts as well as internal residual quantities consistently separated and labeled?	
8.2.6	Is the material and component flow protected against mixing / mix-up?	
8.3	Process Support / Human Resources	
8.3.1	Are the employees responsible and authorized to monitor product / process quality?	
8.3.2	Are the employees suitable for fulfilling the tasks assigned to them and will their qualifications be maintained?	
8.3.3	Is there a staff deployment plan?	
8.4	Material resources	
8.4.1	Is the maintenance and servicing of the production facilities / tools steered preventively?	
8.4.2	Can the quality requirements be effectively monitored with the measuring and testing equipment used?	
8.4.3	Are the work and testing stations adequate to the requirements?	
8.4.4	Are tools, equipment and test equipment properly stored?	
8.5	Process efficiency (integrating effectiveness, efficiency and avoidance of waste)	
8.5.1	Are there any product and process targets?	
8.5.2	Are quality and process data evaluated?	
8.5.3	Are the causes analyzed and the corrective measures checked for deviations from product and process requirements?	
8.5.4	Are processes and products audited regularly?	
8.6	Calibration	
8.6.1	Is a documented calibration procedure with defined calibration frequency carried out?	
8.6.2	Are environmental conditions, calibration method, calibration personnel, calibration data recorded?	
8.6.3	Is calibration status identified for each test machine or associated laboratory equipment requiring calibration?	
8.6.4	If calibrations are performed by an internal calibration department (or laboratory), is performed calibration procedure in accordance with calibration requirements in ISO/IEC 17025?	
8.6.5	If calibrations are performed by an external contractor, is the contractor accredited by ISO/IEC 17025 accredited source? Or, are calibrations performed by an OEM using ISO/IEC 17025 compliant procedures?	
8.7	What should the process accomplish? Process result (output)	
8.7.1	Are customer requirements met in terms of product and process?	
8.7.2	Are the quantities / production lot sizes matched to the requirements and are they specifically forwarded (storage location / work station) to the next process step?	
8.7.3	Are products / components properly stored and are the means of transport / packaging adapted to the specific characteristics of the products / components?	
8.7.4	Are the required markings / records / releases kept and archived accordingly?	

Abbildung 2.2.1 b) Auszug aus dem vorgeschlagenen Qualitätsmanagementsystem für die Batterieproduktion (Teil 2)

Unterarbeitspaket 2.2.2: Definition eines Auditverfahrens für das Qualitätsmanagementsystem (WZL)

Das Ziel des Arbeitspakets 2.2.2 stellt die prozessuale Definition eines Auditverfahrens für das Qualitätsmanagementsystem zur Batterieproduktionsauditierung (Zelle, Modul, Pack) dar. Zur Definition eines Auditverfahrens für das Qualitätsmanagementsystem wurden zunächst ausgewählte Batterieprüfpunkte in den definierten Batterie-Audit-Rahmen integriert. Abbildung 2.2.2 a) veranschaulicht den Integrationsprozess beispielhaft anhand der formulierten Umweltaforderungen an das Auditierungsobjekt.

P7	Plant Safety and Environmental Control
7.1	Does this facility have a facility or corporate safety program?
7.2	Are safety procedures written?
7.3	Are safety procedures current?
7.4	Do employees receive safety orientation before working in the plant area?
7.5	Is safety training documented in a readily retrievable manner that states the name of the employee, the type of training, the date of the training, and the name of the trainer and the signature of the trainer and the participant?
7.6	Does this facility have a formal, written security policy?
7.7	Is adequate ventilation provided?
7.8	Is control of air pressure, dust, humidity and temperature adequate for the manufacture, processing, storage or testing of products?
7.9	If air filters are used, is there a written procedure specifying the frequency of inspection and replacement?
7.10	If air dryers are used, is there a written procedure specifying the frequency of inspection and replacement?
7.11	Do employees do personal hygiene and cleaning, wear masks and wear dust-free anti-static overalls?
7.12	Are there prescribed cleaning routes and procedures for personnel entering clean areas?
7.13	Does the environment meet the production requirements?
7.14	Does the environment of the warehouse for cell storage meet requirements?

7.13	Does the environment meet the production requirements?
7.13.1	Does the temperature meet the requirements?
7.13.1.1	Is the temperature in the slurry mixing zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.2	Is the temperature in the coating zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.3	Is the temperature of the coating head in the range of 24±6°C?
7.13.1.4	Is the temperature of the drying zone in the range of 22±2°C?
7.13.1.5	Is the temperature in the calendaring zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.6	Is the temperature in the slitting zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.7	Is the temperature in the vacuum drying zone less than or equal to 30°C?
7.13.1.8	Is the temperature in the winding zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.9	Is the temperature in the welding zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.10	Is the temperature in the electrolyte filling zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.11	Is the temperature in the glove box below in the range of 18-25°C?
7.13.1.12	Is the temperature in the formation zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.13	Is the temperature in the EOL testing zone in the range of 23±5°C?
7.13.1.14	Is the temperature of the module, pack assembly area in the range of 16-28 degrees Celsius?
7.13.1.15	Is the temperature of the charge and discharge detection area in the range of 25 ± 3 degrees Celsius?
7.13.1.16	Is the temperature of the cell warehouse and PACK finished product warehouse area in the range of 0-25°C?
7.13.2	Does the air cleanliness meet the requirements?
7.13.2.1	Does the air cleanliness in the slurry mixing zone meet the requirements of ISO class 8 of ISO 14644-1?
7.13.2.2	Does the air cleanliness in the coating zone meet the requirements of ISO class 8 of ISO 14644-1(class 8)?
7.13.2.3	Does the air cleanliness of the coating head meet the requirements of ISO class 8 of ISO 14644-1(class 8)?
7.13.2.4	Does the air cleanliness in the coating zone meet the requirements of ISO class 8 of ISO 14644-1(class 8)?
7.13.2.5	Does the air cleanliness in the drying zone meet the requirements of ISO class 8 of ISO 14644-1(class 8)?
7.13.2.6	Does the air cleanliness in the slitting zone meet the requirements of ISO class 8 of ISO 14644-1(class 8)?

Abbildung 2.2.2 a) Integration der ausgewählten Batterieprüfpunkte in den definierten Batterie-Audit-Rahmen am Beispiel der Umwelanforderungen

Die beiden ausgewählten Batterieprüfpunkte

- 7.13 – Entspricht die Umgebung den Produktionsanforderungen?
- 7.14 – Entspricht die Umgebung des Lagers für die Zelllagerung den Anforderungen?

wurden bspw. in den definierten Batterie-Audit-Rahmen integriert. Im Anschluss wurden diese im Hinblick auf die Prüfgegenstände sowie die Kontrollfragen mithilfe detaillierter Fragestellungen überprüft und bspw. prozessschrittspezifisch um die klimatischen Bedingungen im Rahmen der Produktion ergänzt.

Zur verlustfreien Weitergabe von Informationen wie z.B. Prüfmethoden, Stichprobenverfahren, Bewertungsregeln oder Dokumentationsanforderungen, wurde im nächsten Schritt das Batterieauditverfahren und die Verwendung des Audit-Tools in einem Audit-Handbuch detailliert beschrieben. Das Audit-Handbuch, welches das Auditverfahren für das Qualitätsmanagementsystem definiert, dient dabei zur optimalen Vorbereitung der Auditoren auf die Durchführung der Audits. Abbildung 2.2.2b) stellt einen Auszug aus dem Audit-Handbuch dar, in welchem Prüfmethoden für Batterietests zur Sicherstellung der Wiederholbarkeit und Objektivität des Prüfungsprozesses im Prozessschritt „Trocknen“ hinterlegt und erklärt werden.

8.3	Drying
8.3.1	What goes into the process? (Process input)
8.3.2	Work content / process flow (Are all production processes regulated?)
8.3.3	Proc
8.3.4	Ma
8.3.5	Pro
8.3.6	Cal
8.3.7	What should the process accomplish? Process result (output)
8.3.7.1	Are customer requirements met in terms of product and process?
8.3.7.2	Are the quantities / production lot sizes matched to the requirements and are they specifically forwarded (storage location / work station) to the next process step?
8.3.7.3	Are products / components properly stored and are the means of transport / packaging adapted to the specific characteristics of the products / components?
8.3.7.4	Are the required markings / records / releases kept and archived accordingly?
8.3.7.5	Does peel strength of electrode meet the requirement?
8.3.7.6	Does volatile matter content of electrode meet the requirement?
8.3.7.7	Does water content of electrode meet the requirement?

8.3.7.5 Peel Strength of electrode	Cut an electrode sample with a size of 100*40mm and the edge of the sample is required without obvious jagged and blocking phenomenon. Use a double-sided tape to attach the to the prepared steel plate. The foil of the pole piece is peeled off on one side. After strength test machine is clamped. The peeling test is performed using a speed of 100 mm/min, the average value of the peeling strength data of the middle flat section is the peeling strength of the pole piece. The arithmetic mean of result of three parallel measurements is taken as the measurement result.
8.3.7.6 Volatile matter content of electrode	Cut a sample of an electrode plate of a certain area, the edge of sample should be flat and has no obvious jagged or stuck phenomenon. Set the weight of the weight loss meter to (200±2) g and stay for 2 minutes after reaching the set temperature. The punched sample is weighed (m1) and weighed to the nearest 0.1 mg. Repeated operation until the mass difference between the two weighing values is not more than 0.0003 g. Open the weight loss test top cover and put the sampled pole piece after punching into the top cover, and set the baking time to not less than 20min.
8.3.7.7 Water content of electrode	Under the humidity of the environment where the electrode is placed, intercept three sample pieces (0.2-0.3) g of the pole piece, place them in the sample bottle, and seal the bottle mouth quickly and mark it. Seal the drift bottle and blank bottle at the same time. Adjust the Karl Fischer moisture tester to the test state, drying temperature (130-150) °C, air flow rate (30-60) mL/min. Place the drift bottle, blank bottle, and sample vial on the dry sample converter turntable. Start the titration procedure, call up the setting method, and the instrument performs pre-titration.

Abbildung 2.2.2 b) Auszug aus dem Audit-Handbuch für den Prozessschritt „Trocknen“

Unterarbeitspaket 2.2.3: Validierung des definierten Qualitätsmanagementsystems (eLAB Aachen) (WZL)

Das Ziel von Unterarbeitspaket 2.2.3 stellt die Validierung des in Unterarbeitspaket 2.2.2 definierten Qualitätsmanagementsystems dar. Im ersten Schritt wurde zur Validierung des Auditrahmens das Qualitätsaudit für die Batteriezellproduktion gemäß dem Konzept eines Prozessaudits evaluiert. Das Ziel ist hierbei, die Konformität mit den (Qualitäts-) Anweisungen und deren Wirksamkeit zu messen.

Der entwickelte Auditrahmen besteht dabei aus einem vierstufigen Konzeptmodell:

- Stufe 1 – Vorbereitung (Benötigte Dokumente: Audit Plan, Audit Fragebogen)
- Stufe 2 – Durchführung (Benötigte Dokumente: Audit Checkliste)
- Stufe 3 – Bewertung (Benötigte Dokumente: Evaluierungsschema, Audit Action Plan)
- Stufe 4 – Bericht (Benötigte Dokumente: Audit Bericht)

Die Umsetzung, Validierung und Optimierung des entwickelten Auditrahmens (vgl. Abbildung 2.2.3 a)) erfolgte auf Grundlage von zwei aufeinanderfolgenden Auditdurchläufen im Elektromobilitätslabor (eLab) der RWTH Aachen University an einer Pilotlinie zur Batteriezellproduktion. Hier wurden die Unterschiede zwischen zwei Auditdurchläufen (Abbildung 2.2.3 b)) im Hinblick auf:

- die Anzahl auditiertes Prozesse
- die Prozesskategorien und Unterkategorien
- die Optimierung von Maschinenparametern
- die sichere Entsorgung von nicht konformen Teilen
- den Produktionskontrollplan
- die Integration der IATF 16949 Referenzen
- die Bewertung des Audits

gegenübergestellt. Durch den Abschluss der Validierung konnten sowohl prozessuale als auch technisch basierte Erkenntnisse gewonnen werden, welche in die Optimierung des prozessualen Batterieaudits gespiegelt wurden und in den generischen Konzeptrahmen eingeflossen sind. Die prozessualen Erkenntnisse fokussieren dabei auf den vierstufigen Auditrahmen sowie die hierfür benötigten Unterlagen und listen technische Implikationen aus den Audit-Iterationsschleifen auf. Wie in Abbildung 2.2.3 c) veranschaulicht, sind die technisch basierten Erkenntnisse prozessspezifisch auf die Produktionsumgebung (eLAB) und Ressourcen zu beziehen. Vor diesem Hintergrund wurden diverse Fragestellungen aus dem Audit-Fragebogen zum betrachteten Prozessschritt kategorisiert in:

- Ausrüstung
- Atmosphäre
- Input Material
- Prozess
- Output Material
- Personal
- Ressourcen

- Prüfverfahren

und inkl. der Feststellungen aus den Auditläufen dokumentiert. Unter Berücksichtigung der Feststellungen und Erkenntnisse konnten somit im nächsten Schritt auditkritische Aspekte identifiziert und anschließend sicherheits- und qualitätskritische Maßnahmen definiert werden (vgl. Abbildung 2.2.3 d – Auszug aus der Batteriezellenherstellung).

Im Anschluss wurde eine quantitative Audit-Bewertung auf Basis der Validierungsergebnisse (vgl. Abbildung 2.2.3 e)) durchgeführt. Als Richtlinie für die Punkteverteilung wurde folgende Benotungsskala:

- 5 – sehr gut
- 4 – gut
- 3 – noch akzeptabel
- 2 – Verbesserungsbedürftig
- 1 – sehr schlecht
- 0 – nicht existent oder fast nicht existent

eingeführt. Nachdem die Bewertung für beide Auditdurchläufe durchgeführt wurde, konnte diese auch im Rahmen der Bewertung, wie in den Abbildungen 2.2.3 f), 2.2.3 g) und 2.2.3 h) gezeigt, gegenübergestellt werden.

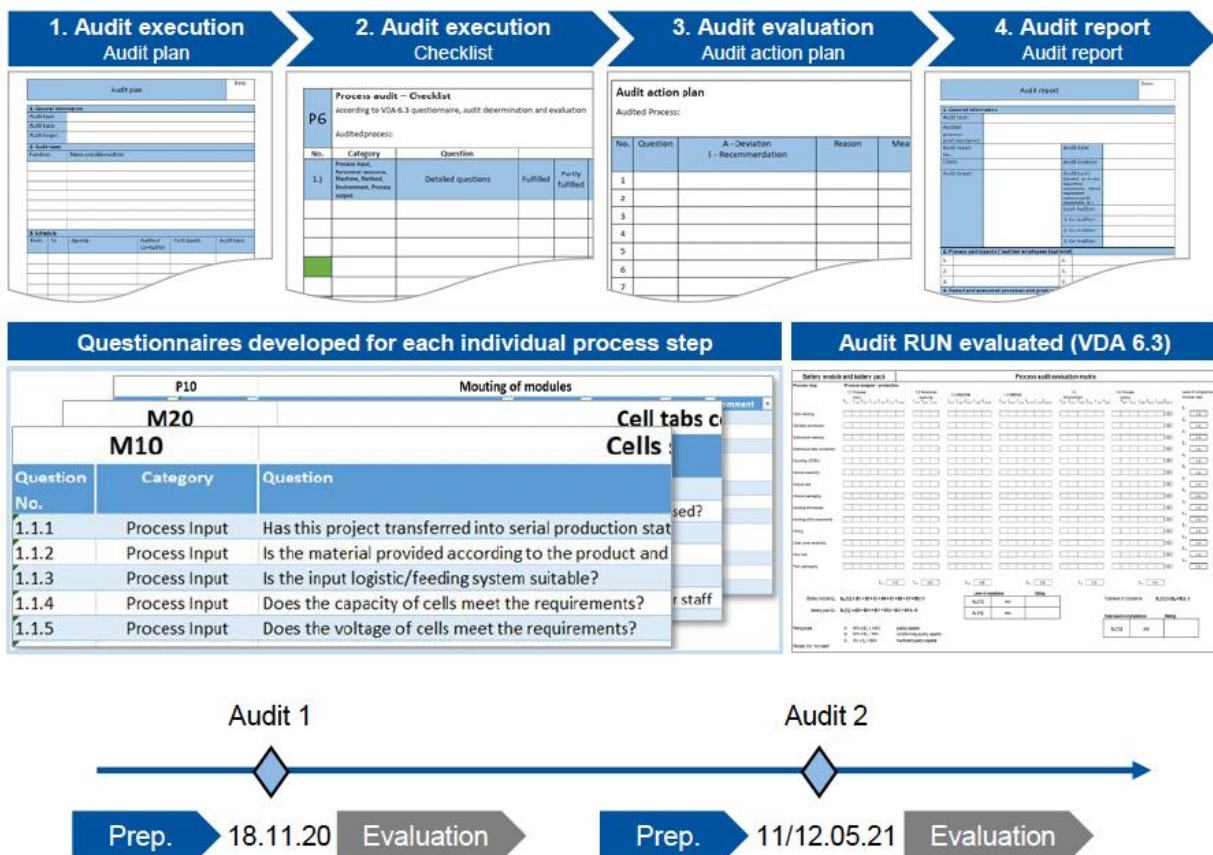


Abbildung 2.2.3 a) Auditdurchläufe im Elektromobilitätslabor (eLAB) der RWTH Aachen

AUDIT RUN DIFFERENCES		
Audit run parameters	1 st run (18.11.20)	2 nd run (11/12.05.21)
Audited processes	7	11
Process category and sub-category	Electrode manufacturing: Mixing, Coating, Drying, Calendering Cell Assembly: Stacking, Packaging, Electrolyte filling	Electrode manufacturing: Mixing, Coating, Drying, Calendering Cell Assembly: Slitting, Stacking, Packaging, Electrolyte filling Cell finishing: Formation, Degassing, Aging
Optimization of machine parameters	✗	✓
Safe disposal of non-conforming parts	✗	✓
Production control plan	✗	✓
IATF 16949 references integration	✗	✓
Evaluation of audit	✗	✓

Abbildung 2.2.3 b) Gegenüberstellung der Auditudurchläufe

Process Step: Mixing			
Question No.	Category	Question	Audit Findings
	Equipment, Atmosphere, Input Material, Process, Output Material, Personnel resources, Test procedure	Detailed questions	Annotation
1.1.8	Equipment	Is the machine maintenance carried out according to the requirements at the production facility?	Only reactive maintenance is carried out
1.3.2	Input material	Is the application equipment differently assigned for cathode and anode side?	Cathode mixing is currently not performed at PEM
1.4.6	Process	How are quality defects detected during the manufacturing process?	Defects are not detected during process
1.5.1	Output material	Is the viscosity of the slurry according to the process requirement?	Not measured currently
1.5.4	Output material	Is the density of the slurry according to the process requirement?	Not measured currently

Abbildung 2.2.3 c) Auszug zu den prozessspezifischen und technisch-basierten Erkenntnissen im Rahmen der Batteriezellenherstellung

Process Step: Mixing				
Question No.	Audit findings	Learning	Critical aspects	Measures
1.1.8	Only reactive maintenance is executed	Absence of preventive maintenance plan and implementation	Absence of preventive maintenance would result in frequent breakdowns	Preventive maintenance plan must be drafted to ensure smooth operation
1.3.2	Cathode mixing is currently not performed at PEM	Cathode slurry contains a highly flammable solvent	System should be in place for recovering the solvent in the drying stage	Further measures need to be implemented in order to handle flammable solvent
1.4.6	Quality defects are not detected during the process	Only temperature is measured during the process	Other quality features such as homogeneity and purity cannot be assessed	Equipment which detects essential quality features should be incorporated
1.5.1	Viscosity of the slurry is not measured currently at PEM	Equipment not available	Viscosity is an essential quality feature of the slurry (processibility, coating surface quality, ...)	Equipment should be procured
1.5.4	Density of the slurry is not measured currently at PEM	Equipment not available	Density would aid in assessing the weight of coated material on electrodes	Equipment should be procured

Abbildung 2.2.3 d) Auszug zu den kritischen Aspekten und definierten Maßnahmen hinsichtlich der prozessspezifischen und technisch basierten Erkenntnisse im Rahmen der Batteriezellenherstellung

Score	Implementation and Results (30%)
-	5% – Do we audit across all operation shifts?
-	5% – Level of auditor training – requirements + factual
-	5% – Amount of audits dedicated to improvement activities
-	5% – Documented and structured method for evaluating validity and classification of findings
-	5% – Adequacy of resources
-	5% – Use of varying types of audits – i.e. process, product, trace, system, element etc.
	Subtotal = Potentially 100%
+	Value Add %
-	Reality Check %
	TOTAL

Abbildung 2.2.3 e) Quantitative Audit-Bewertung für die Implementierung und die Validierungsergebnisse

AUDIT EVALUATION (QUANTITATIVE)			
1 st run	2 nd run		
19% (48%)	32% (80%)	Planning: 40% (100%) / Criteria	Feedback 2nd audit run
1	5	5% – All scheduled that should be scheduled	All processes were scheduled
3	3	5% – All conducted that were scheduled	Mixing and drying (for cathode), coating, calendaring and aging were not conducted
2	4	5% – Percentage on time vs. schedule	-
2	5	5% – All non-scheduled were conducted	There were no non-scheduled audits so full credit
3	5	5% – Annual audit plan approved by site management	Two audit validation runs per six months
3	3	5% – Audit program tied to QMS evaluation metrics and corporate goals	-
5	5	5% – Individual audit plans approved by Lead Auditor/Quality Management with input from process owner –	Audit plans were communicated from audit team and approved from process owner
0	2	5% – Audit program is well integrated with risk management program	Risk management program is currently under optimization

Abbildung 2.2.3 f) Gegenüberstellung der quantitativen Audit-Bewertung der (Teil 1)

AUDIT EVALUATION (QUANTITATIVE) – Continued			
1 st run	2 nd run		
19% (63%)	22% (73%)	Reporting, Records and Analysis: 30% (100%)	Feedback 2nd audit run
		Reporting – 10%	
5	5	Reported to site level management	-
5	5	Reported to Quality Manager	-
		Data Analysis – 10%	
1	4	Reported data regularly analyzed and acted upon	Second audit run confirmed whether findings from the first audit run were implemented on the production line
		Records – 10%	
5	5	Records maintained – audit reports	Electronic copies of audit reports and schedule maintained
3	3	Records maintained – training records	-
0	0	Records maintained – quarterly/annual summary reports	-

Abbildung 2.2.3 g) Gegenüberstellung der quantitativen Audit-Bewertung der Auditudurchläufe (Teil 2)

AUDIT EVALUATION (QUANTITATIVE) – Continued			
1 st run	2 nd run		
22% (73%)	25% (83%)	Implementation and Results : 30% (100%)	Feedback 2 nd audit run
5	5	5% – Do we audit across all operation shifts?	The processes occur only on day shift
2	4	5% – Level of auditor training – requirements + factual	Auditors comprehensively studied and acquired hands on experience on the production plant
3	3	5% – Amount of audits dedicated to improvement activities	Both audit runs (process audits) were dedicated towards improvement activities
4	5	5% – Documented and structured method for evaluating validity and classification of findings	-
5	5	5% – Adequacy of resources	Adequate resources to implement program
3	3	5% – Use of varying types of audits	Currently only process audit has been conducted
60%	79%	Subtotal = Potentially 100%	
+ 0	+ 2.5	Value Add % (+ 2 points for excess electrolyte factor and + 0.5 points for non-conforming parts disposal)	
- N/A	- N/A	Reality Check %	
60%	81.5%	TOTAL	

Abbildung 2.2.3 h) Gegenüberstellung der quantitativen Audit-Bewertung der Auditdurchläufe (Teil 3)

Im Rahmen des Unterpaketes 2.2.3 wurde im eLAB der RWTH Aachen ein zusätzliches Audit-Einführungsvideo für die Batteriezellproduktion in Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Mitarbeitern vom WZL und PEM der RWTH Aachen University konzipiert, aufgenommen und vorgestellt.

Unterpaket 2.2.4: Entwicklung eines Normentwurfs in Zusammenarbeit mit der TÜV Rheinland Consulting GmbH (WZL)

Das Ziel des Unterpaketes 2.2.4 ist die Erarbeitung eines gemeinsamen Normentwurfs mit der TÜV Rheinland Consulting GmbH für ein Prüfverfahren, das die Sicherheit und Qualität der geprüften Batterien in allen Phasen der Nutzung und Produktion gewährleistet. Vor diesem Hintergrund wurde in sieben Workshops die Struktur der Norm festgelegt sowie deren Inhalt definiert. Die Struktur ist gemäß Abbildung 2.2.4 a) aufgebaut. Sie beinhaltet ein Deckblatt, ein Inhaltsverzeichnis, den Gültigkeitsbereich sowie einen allgemeinen als auch spezifischen Teil. Das Deckblatt gibt Auskunft über die Version der Norm und Entwicklung, während das Inhaltsverzeichnis den systematischen Aufbau wiedergibt. Im Gültigkeitsbereich hingegen wird der gesamte Umfang definiert, für welchen die Norm gültig ist. Im Beispiel der Produktion werden weiterhin im allgemeinen Teil technische Terme definiert und im spezifischen Teil ein Überblick über den Batterieproduktionsprozess verschafft inkl. Fallunterscheidungen für die spezifischen Batteriezellformate (Rundzelle, prismatische Zelle, Pouch Zelle) formuliert.

Abbildung 2.2.4 b) veranschaulicht beispielhaft den Aufbau sowie Inhalt im spezifischen Teil für den produktionsorientierten Normentwurf. Zudem findet eine Fallunterscheidung zwischen einer Prismatischen-, Pouch- und Rundzelle statt. Anschließend erfolgt eine generische Prozessbeschreibung mit dem Ziel, ein gemeinsames Verständnis für die Fertigungskette in der Batterieproduktion zu schaffen. Im Anschluss werden relevante Sicherheitsmaßnahmen definiert, die für den spezifischen Prozess gelten. Daraufhin werden relevante Parameter tabellarisch hinsichtlich den vordefinierten Parameterkategorien

- Umwelt
- Input Material
- Prozess

- Output material

klassifiziert sowie abgeleitete Anforderungen aus dem Forschungsvorhaben StarTest dokumentiert. Weiter werden in der Tabelle zur Angabe eines Parameterbereiches Anmerkungen im Hinblick auf den Sollwert bzw. die Toleranzen festgehalten. Im Weiteren wird differenziert, ob die betrachteten Parameter signifikant für die Kontrolle in der Produktion sind, sodass angegeben werden kann, ob sie bei der Produktion kontrolliert werden sollen oder müssen. Relevante Kontrollparameter werden von den Auditoren in ihrer Audit-Checkliste und den Dokumenten berücksichtigt. Der Entwurf des Normenvorschlages wurde gemeinsam mit der TÜV Rheinland Consulting GmbH erstellt und bereits in erste relevante Fachgremien zur Diskussion über eine mögliche Umsetzung ausgespielt. Demnach wurden erste Schritte für die Bereitstellung der Forschungsergebnisse im erweiterten Industriekreis angestoßen, welche erfahrungsgemäß eine mehrjährige Vorlaufzeit innehaben.

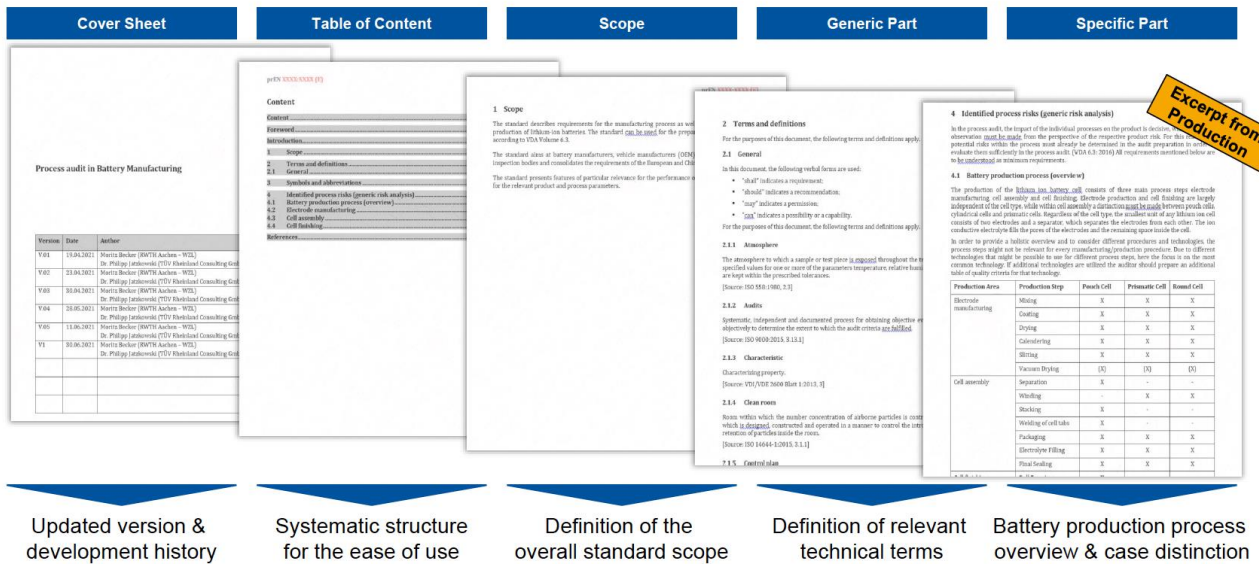


Abbildung 2.2.4 a) Auszug aus dem „Normentwurf“ am Beispiel der Produktion (Teil 1)

Generic process description for a mutual understanding of the consecutive manufacturing chain in battery production

Relevant safety measures applicable for each specific process

Standard parameter categories for the systematic testing are predefined in the standard draft:

- Environment
- Input Material
- Process
- Output Material

prEN XXXX-XXXX (X)

4.2.2 Coating

The foil is coated with the slurry using an application tool (e.g. scribe, doctor blade, anilox roller). The foil is coated either continuously or intermittently in the coating direction. Generally, the top and bottom sides of the foil are coated sequentially. The coated foil is continuously transferred to the dryer. After the first drying process, the foil coated on one side is fed back to the coating system by a manual transport process. Afterwards, the second side is coated according to the process described.

Safety measures
No specific qualification requirements.

Relevant parameters

Classification	Parameter	Requirement	Nominal value / tolerance	Control plan
Environment (coating zone)	Atmosphere	The atmosphere shall be clean to avoid contamination of the slurry with particles.	• Protective gas • Vacuum or • Cleanroom following ISO 14644 classification B	No
	Room temperature	shall be controlled	Derived from the requirements of the used input material.	No
Raw material (Input)	Foil material	shall be controlled	• Aluminium • Copper Should be subject to the process for ensuring the quality of externally supplied products (in accordance with IATF 16949 & I.S.).	No
	Process	Coating speed	should be controlled	Derived from the process requirements.
Slurry temperature		should be controlled	Derived from the process requirements.	No
Foil protection		should be controlled	Derived from the process requirements.	No
Product (Output)	Coating thickness (wet film)	should be controlled continuously	Derived from the requirements of the foil material and the process requirements.	Recommended
	Coating width (wet film)	should be controlled continuously	Derived from the requirements of the foil material and the process requirements.	Recommended

Version number

Case distinction for prismatic, pouch and round cells

Suggestion for relevant control parameters in production.

Those are indicated, whether they **shall** or **should** be controlled during the production. Furthermore nominal values and tolerances are given for the indication of a parameter range.

Auditors will look for those parameters and account for them in their audit checklist and documents.

Reference to extending standards is given.

Abbildung 2.2.4 a) Auszug aus dem „Normentwurf“ am Beispiel der Produktion (Teil 2)