

Abschlussbericht

Verbundvorhaben: accuRate – Mess- und Rechenverfahren zur schnellen und präzisen Bewertung gebrauchter Li-Ionen-Batterien

Teilvorhaben: Entwicklung und Validierung mit realen Anwendungsszenarien

Zuwendungsempfänger – TES-AMM Central Europe GmbH

Förderkennzeichen: 03ETE032B

Projektlaufzeit: 01.12.2020-30.11.2024

Berichtszeitraum: 01.12.2020-30.11.2024

Erstellungsdatum: 16.07.2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

I Kurzdarstellung	2
1. Aufgabenstellung	2
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4. Wissenschaftlich, technischer Stand	7
4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte die genutzt wurden	7
4.2 Verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste	8
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
II Eingehende Darstellung	11
1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	11
2. Arbeitsfortschritte und erzielte Ergebnisse während der Laufzeit	11
2.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	11
2.2 Projektergebnisse Zeitraum 12/2020-12/2022	12
2.3 Projektergebnisse Zeitraum 12/2022 – 11/2024.....	20
3. Relevanz der erzielten Ergebnisse und Fortschreibung des Verwertungsplanes	27
4. Erzielte Fortschritte innerhalb des Forschungsgebietes durch Dritte während der Projektlaufzeit	27
5. Übersicht erfolgter oder geplanter Veröffentlichung des Ergebnisses ... 28	
Abbildungsverzeichnis	29
Tabellenverzeichnis	29

I Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projektes accuRate bezog sich auf die Entwicklung eines Verfahrens zur Kapazitätsbestimmung von gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien mittels Innenwiderstandsmessung. Hierbei soll der Alterungszustand der Batterie schnell und präzise mess- und bewertbar werden.

Durch dieses Teilvorhaben sollte insbesondere das von LiPlus entwickelte Verfahren und der generell in der Literatur beschriebene Korrelation von Kapazitätsabnahme und Zunahme des Innenwiderstandes als Maß für das elektrochemische Alter einer Lithium-Batterie anhand realer Anwendungsszenarien.

Durch präzise und schnelle Messverfahren wie das von LiPlus entwickelte Verfahren sollen bisher aufwendige und nur von spezialisierten HV-Technikern durchführbare Testungen vereinfacht und damit kommerziell nutzbar gemacht werden.

TES ist als auf dem Gebiet der Life-Cycle Analyse und Zweitvermarktung von elektronischen Produkten weltweit führend und hat dadurch schon mehrere Millionen Batteriebewertungen durchgeführt. Dieser Erfahrungs- und Wissensvorsprung im Bereich Second-Life Anwendungen soll auch den Partner zugutekommen. Ein entsprechend schnelles und zuverlässiges Messverfahren kann z.B. auch auf das neue Geschäftsfeld EV-Batterien übertragen werden.

Um der im Antrag formulierten Aufgabenstellung gerecht zu werden hat die TES an ihrem Standort in Herten ein Prüflabor für Geräte- und EV-Batterien eingerichtet.

Im Laufe des Projektes kristallisierte sich dessen Relevanz immer mehr heraus, da insbesondere das Thema schneller und unkomplizierter Messverfahren kritisch für ein Vertrauen in den „second-life“ Markt für Li-Batterien ist, der immer noch mit großen Informationsasymmetrien und damit verbundenen Unsicherheiten behaftet ist.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben accuRate „Mess- und Rechenverfahren zur schnellen und präzisen Bewertung gebrauchter Lithium-Ionen-Batterien“ mit den drei Teilvorhaben „Analyse der Korrelation zwischen Innenwiderstand und Kapazität gebrauchter Lithium-Ionen-Batterien“, „Überführung des neuen Verfahrens in nutzerfreundliche Hard- und Software“ und „Entwicklung und Validierung mit realen Anwendungsszenarien“ wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) vom Projektträger Jülich (PTJ/FZ Jülich) unterstützt.

Das Vorhaben wurde durch 3 ganz verschiedene Konsortialpartner durchgeführt. Die alle durch ihre jeweiligen Stärken zum Projekterfolg

beigetragen haben. LiPlus hatte das innovative Messverfahren und die TUM die relevanten Kenntnisse in DataScience und bereits eine umfängliche Datenbank an Batteriedaten. Die TES wiederum hat als ein weltweit tätiges Unternehmen im Bereich der IT-Asset Lifecycle Solutions sowie dem Recycling von Elektroschrott und Lithium-Ionen Batterien einen Bezug zur Praxis und bereits langjährige Erfahrungen in der Testung von Batterien. Ebenfalls hat die TES Zugang zu real gealterten Batterien verschiedenster Bauart die ggf. vor einem Recycling besser einer second-life Verwendung zugeführt werden können.

Im Rahmen des Projektes wurden seitens TES stationäre Prüfplätze zur Messung von EV-Batterien (Zellen, Module, Packs) geschaffen und eingerichtet. Hierfür wurde am Standort Herten auf ca. 250m² ein ganz neuer Bereich eingerichtet, das „Technikum“ der mit verschiedensten Lasten je nach Kapazität der zu testenden Batterie ausgestattet wurde. Ebenfalls wurden Vorkehrungen getroffen um das Risiko im Umgang mit Lithium-Ionen Batterien zu minimieren und ein Testbereich in einem Seecontainer geschaffen, der der Testung und Entladung von kritischen Batterien dient. Auch wurde ein Havariebehälter und entsprechend andere notwendige Laborausrüstung wie Feuerschutzdecken beschafft.



Abbildung 1: Technikum TES-AMM Central Europe GmbH

So ausgestattet, konnte durch unsere spezialisierten HV-Elektroingenieure aus dem F&E Bereich verschiedenste Messreihen durchgeführt werden, Erkenntnisse gewonnen und mit den Konsortialpartnern geteilt werden. Die Startphase des Projektes stand unter dem Eindruck der vorherrschenden Corona-Pandemie was zu Einschränkungen in der Labornutzung und in der vor-Ort Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern führte.

Ebenfalls wurde die Beschaffung der notwendigen Laborausstattung durch die Corona-Pandemie und den folgenden Ukrainekrieg durch erheblich gestiegene Lieferfristen verzögert.

Alles in allem konnten diese und andere aufgetretene Herausforderungen aber erfolgreich gemeistert und das Projekt zu einem guten Abschluss gebracht werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in insgesamt 6 Arbeitspakete unterteilt. Deren Abarbeitung war zunächst für insgesamt 36 Monate angesetzt und startete im Dezember 2020. Auf Grund einiger nicht steuerbarer äußerlicher Einflüsse u.A. die Corona-Pandemie wurde die Laufzeit kostenneutral bis November 2024 verlängert.

Im Folgenden sind die einzelnen Teilarbeitspakete kurz dargestellt.

In **AP1** stand die Adaption und Erweiterung der Messgeräte und der Messumgebung im Fokus. Die Koordination dieses AP wurde durch LiPlus übernommen. Für das Forschungsprojekt mussten die Messstände und Messgeräte der Partner angepasst und einsatzfähig sein. In **AP 1.1** hat LiPlus sein bestehenden Messgeräte optimiert und den Funktionsumfang erweitert. In **AP1.2** wurde an der TUM eine Messumgebung für Einzelzellen aufgebaut und mit der Technik und Unterstützung von LiPlus in Betrieb genommen. Mit der eingerichteten Messumgebung sollen elektrochemische Charakterisierung von Einzelzellen sowie Puls- und Impedanzmessungen realisiert werden können. Neben Einzelzellen sollten auch Gerätebatterien getestet werden, der Aufbau und die Inbetriebnahme dieser Prüfplätze sollte bei TES und TUM im Rahmen des **AP1.3** realisiert werden. Bei TES wurde im Rahmen dieses **AP 1.3** ein Prüfplatz zur Messung des Innenwiderstandes und anderer relevanter Parameter errichtet.

In **AP1.4** wurde nach gleicher Manier ein stationärer Prüfplatz zur Messung von EV-Batteriepacks eingerichtet, dieser unterscheidet sich durch seine technischen Anforderungen von den bisher in Betrieb genommen Messständen für andere Batterietypen.

AP2 bezieht sich auf das zentrale Datenhandling. Durch accuRate sollen bereits verfügbare Informationen und Zusammenhänge aus der Literatur mit realen Messergebnissen der Prüfstände aus AP1 verknüpft werden. Die TUM

sowie die TES verfügten bereits über eigene aus vergangenen Projekten generierte Messreihen, diese wurden in **AP 2.1** gesichtet und geeignete Datensätze ausgewählt. Ebenso wurde eine Liste der notwendigen Parameter im Konsortium abgestimmt. In **AP2.2** wurde die Struktur der verwendeten Datenbank definiert. Nachdem dies geschehen ist, wurden in **AP2.3** die Daten von TES die in AP2.1 definiert wurden ebenfalls in diese Datenbank überführt. Die Verfügbarkeit der Datenbank muss für die gesamte Laufzeit des Vorhabens sichergestellt werden (**AP 2.4**).

In **AP3** werden dann nach getroffenen Vorbereitungen Messreihen an real gealterten Batterien durchgeführt. Um vergleichbare Messergebnisse zu erzielen, werden in **AP3.1** Voruntersuchungen zu Einflussfaktoren getätigt bei allen Typen (Zellen, Module, EV-Batteriepacks). Anschließend werden Messungen an gealterten Einzelzellen (TUM **AP 3.2**) Gerätebatterien (TES **AP3.3**) sowie EV-Packs (TES und LiPlus **AP3.4**). Auch diese Daten wurden mit den Konsortialpartner geteilt und in die vorgesehene Datenbank übernommen.

In **AP4** erfolgt mittels der in den vorherigen APs gewonnenen Daten eine tiefgreifende Analyse der Korrelation zwischen Innenwiderstand und Kapazität gebrauchter Li-Batterien. Diese werden statistisch beschrieben und anschließend mathematisch dargestellt. Durch diese Funktionen ist es möglich, auch messbaren Widerstandswerten die restliche Batteriekapazität zu berechnen. **AP4.1** beinhaltet die Auswahl geeigneter mathematischer Methoden. In **AP4.2** sollen dann seitens TUM die gewonnenen Erkenntnisse zur Korrelation in einer wissenschaftl. Veröffentlichung zusammengetragen werden. In **AP4.3** soll dann die analytische Berechnung der Kapazität aus dem Innenwiderstandswerten definiert sein.

Mit **AP5** schließt sich alsbald die Detailanalysen der empirischen Ergebnisse aus AP4 an. Es soll der Mechanismus hinter der Korrelation und die in unterschiedlichen Batterietypen dominierenden Alterungsprozesse näher beleuchtet werden. Hierfür sollen sowohl Detailvermessungen als auch elektrochemische Charakterisierung an Ausreißern durchgeführt werden (**AP5.1**) d.h. an Batterien, die nicht den zu erwartenden Parametern entsprechen. Dies wird durch Laboruntersuchungen an geöffneten post-mortem Zellen ergänzt (**AP5.2**).

In **AP6** wird schließlich die industrielle Transferierbarkeit des in accuRate entwickelten Messverfahrens geprüft. Zielstellung ist hierbei ein breiter, kommerzieller Einsatz des Verfahrens. Hierfür werden die Ergebnisse auf Allgemeingültigkeit, Skalier- und Übertragbarkeit geprüft sowie erste Maßnahmen zur Kommerzialisierung getroffen. (**AP 6.1** und **AP6.2**). Falls notwendig, werden die Messgeräte entsprechend angepasst (**AP 6.3**).

Zur Sicherung der Zielerreichung und Messung des Projektfortschrittes während der Laufzeit wurden insgesamt 4 Meilensteine definiert. Eine Übersicht der definierten Arbeitspakete und der beteiligten Partner wird in nachfolgender Tabelle dargestellt.

AP	Partner
1.1 Erweiterung LiPlus-Testgeräte	Li.plus
1.2 Einzelzellenprüfstand	TUM, Li.plus
1.3 Gerätebatterienprüfstand	TUM, TES
1.4 Prüfstand EV-Packs	Li.plus, TES
2.1 Screening verfügb. Daten	TUM, TES, Li.plus
2.2 Vorverarbeitung/Struktur	TUM, Li.plus
2.3 Zentrale Datenbank	TUM, TES, Li.plus
2.4 Pflege, Support	TUM
3.1 Einflussfakoren	TUM, Li.plus
3.2 Messung Einzelzellen	TUM
3.3 Messung Gerätebatterien	TES, Li.plus
3.4 Messung EV-Packs	TES, Li.plus
4.1 Methodenauswahl	TUM
4.2 Korrelationen untersuchen	TUM, Li.plus
4.3 Analytische Funktionen	TUM, Li.plus
5.1 Detailvermessung TUM, Li.Plus	TUM, Li.plus
5.2 Post-Mortem Analyse	TUM
6.1 Skalierung von Zell- auf Packebene	Liplus, TUM
6.2 Verfahrensbewertung	TUM, Li.plus, TES
6.3 Feinanpassung Messgerät	Li.plus

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

Insgesamt bildete diese detaillierte Beschreibung der Arbeitspakete, sowie die vorhandenen Redundanzen einen geeigneten Rahmen den Projekterfolg sicherzustellen und die Fortschritte konstant zu überprüfen.

4. Wissenschaftlich, technischer Stand

4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte die genutzt wurden

Zu Projektanfang, gab es noch keine einheitlichen Standards zur Zustandsbewertung von LiB die im großen und kommerziellen Stil eingesetzt werden. Verfügbare Publikationen bezogen sich auf Messungen und Verfahren an bestimmten Batterietypen und auf spezifische schon länger am Markt verfügbare Zellchemien. Oft sind Ergebnisse in der Literatur eng auf definierte Designs begrenzt, somit können diese nicht skaliert oder verallgemeinert werden und daher aus ihnen keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden können.

Es müssen verschiedene Kennzeichen und Parameter der Batterien ermittelt werden wie bspw. Zustand, d.h. meist Restkapazität (SoH - kapazitiv). Hierfür gibt es erst einige wenige standardisierte Herangehensweisen bspw. nach DIN 62660-1.

Der Bedarf an solchen Verfahren eilt naturgemäß den tatsächlichen Markteinführungen hinterher. Batterien verfügen über eine gewisse Lebensdauer, die auf Grund der neuen Technologie noch nicht abschließend vollständig bewertet werden konnte. Andererseits können Messverfahren und Zustandsbewertungen beliebig komplex werden. Dies können sich z.B. auch je nach angedachter 2nd life Verwendung oder Lastprofilen unterscheiden.

Bisheriges Standardverfahren zur Bestimmung der Restkapazität orientiert sich an den Vorgaben der DIN EN 62660-1. Die Batterie wird zuerst vollständig geladen und dann unter kontrollierten Bedingungen entladen. Hier wird üblicherweise die Batterie bei 50% Ladezustand getestet, da in den Randbereichen des Ladezustandes <20% oder >80% die Werte wie bspw. Innenwiderstand an Aussagekraft verlieren, da sie überproportional zunehmen.

Ebenfalls möglich ist die Bestimmung der Kapazität einer verbauten Batterie durch Nutzung des Gerätes und Messung der Zeitdauer bis zur vollständigen Entladung. Beide Verfahren sind aber sehr zeit- und ressourcenintensiv sowie anfällig für verschiedenste Störgrößen (Temperatur, Stromstärke etc.) was einen Vergleich der Ergebnisse erschwert.

Ebenfalls kann der aktuelle Widerstandswert einer Batterie mittels Einprägung einer oder mehrerer Stromimpulse und Messung der Spannungsantwort gemessen werden. Auch hier variieren die Aussage nach Batterietyp, Nutzungshistorie, Ruhephase etc. Zudem sind die Werte über den Lebenszyklus der Batterie nur bedingt miteinander vergleichbar. Diese Bestimmung ist für die Praxis irrelevant und kann bei Fahrzeugbatterien mit größerer Spannung bis 800V nur noch bedingt Anwendung finden.

Die Literatur zeigt, dass eine Korrelation zwischen Kapazitätsabnahme und Anstieg des Innenwiderstandes existiert. Ein Anstieg der Impedanz korreliert mit dem Kapazitätsverlust der Batterie, dies gilt über verschiedenen Kombinationen von Anoden- und Kathodenmaterial also unterschiedliche Zellchemien hinweg. Ebenfalls existieren Studien die einen Anteil des Kapazitätsverlustes sowie die Zunahme des Innenwiderstandes auf die gleichen Alterungsmechanismen zurückführen und hierdurch ebenfalls die These einer Korrelation stützen.

Messungen die mittels in die Batterie integrierter Sensoren (BMS-Systeme) durchgeführt werden, weisen ebenso Unsicherheiten und Schwächen auf, insbesondere was Langzeitstabilität und Anwendbarkeit auf unterschiedliche Betriebsszenarien betrifft. Ebenfalls sind die verbauten BMS -Systeme überwiegend herstellereinspezifisch können also nicht verallgemeinernd Anwendung finden bzw. mit einer anderen Batterie kombiniert werden.

Ziel des Projektes ist es ein Verfahren zur Kapazitätsbestimmung mittels Innenwiderstandsmessung zu entwickeln, das eine vollständige Bewertung in weniger als 5 Minuten statt in bisher ca. 30 min ermöglicht.

Ebenfalls ist durch die mögliche Anwendung auf die Bewertung von Batteriepacks aus Elektrofahrzeugen ein neuer Anwendungsfall mit hohem Innovationspotential gegeben. Dies beinhaltet ebenfalls ein hohes kommerzielles Potential. Denn das zu entwickelnde Tool soll einen breiten Einsatzbereich abdecken von Wissenschaft und Forschung bis zur Autowerkstatt.

4.2 Verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Grundsätzlich wurde die meiste Literaturrecherche seitens TES bei der Erstellung des Förderantrages und im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten im Konsortium zur Durchführung des Projektes getätigt. Hier können also insb. die Quellen für den Forschungsantrag genannt werden ebenso wurden Quellen bzgl. der vorhandenen Messverfahren und zu Elektrischen Lasten und ähnlichem gesichtet. Diese definierten den Stand der Forschung und legten den Grundstein für die Entwicklung unserer Arbeitspakete.

Unter anderem wurden exemplarisch folgende Publikationen zu Rate gezogen

DIN EN 62660-1:2012-04, Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 1: Prüfung des Leistungsverhaltens, 2012.

Aviloo GmbH, „Aviloo Batterie Test ,” [Online]. Available: <https://aviloo.com/aviloo-batterie-test/>. [Zugriff am 31 07 2020].

Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., van Mierlo, J. und van den Bossche, P.: Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016), S. 572–587. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.042.

D.Corrigan und X.Liu, „Pulse Power Testing of Batteries and Supercapacitors for Hybrid Electric Vehicle Applications: A Comparison of Constant Current, Constant Power and Ramped Power Transients,” *SAE Technical Papers*. 08 04 2013.

S.Schuster, M.Brand, C.Campestrini, M.Gleissenberger und A.Jossen, „Correlation between capacity and impedance of lithium-ion cells during calendar and cycle life,“ *Journal of Power Sources*, Nr. 305, pp. 191-199, 15 02 2016.

J.Schmitt, A.Maheshwari, M.Heck, S.Lux und M.Vetter, “Omedance change and capacity fade of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries during calendar aging,” *Journal of Power Sources*, Nr. 353, pp. 885-897, 02 2013.

W.Laletin, K.Salloux und L.Braeshear, “A Method and Apparatus for measuring and analyzing electrical or electrochemical!. WPO Patent WO2004/106946 A2, 21 05 2003.

M.Naumann, M.Schimpe, P.Keil. H.Hesse und A.Jossen, „Analysis and modeling of calendar aging of a commercial LiFePo₄/graphite cell,” *Journal of Energy Storage*, pp. 153-169, 2018.

S.Schuster, T.Bach, E.Fleder, J.Müller, M.Brand, G.Sextl und A.Jossen, „Nonlinear aging caharacteristics of lithium-ion cells under different operational conditions,” *Journal of Energy Storage*, p.44-53, 2015.

P.Keil und A.Jossen, „Impact of Dynamic Driving Loads and Regenerative Braking on the Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles,“ *Journal of the Electrochemical Society*, pp. A3081-A3092, 2017.

Xiong, R., Li, L. und Tian, J.: Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. In: *Journal of Power Sources* 405 (2018), S. 18–29. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.10.019.

I.Zilberman, S.Ludwig, M.Schiller und A.Jossen, „Online aging determination in lithium-ion battery module with forced temperature gradient,“ *Journal of Energy Storage*, p. 101-170, 2020.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Insgesamt hats sich Dreiteilung der Arbeitspakete je nach Tätigkeitsschwerpunkt der Konsortialpartner bewährt. Grundsätzlich hat Li-Plus das notwendige Messverfahren zur Verfügung gestellt, die TUM hat mit ihrer Forschungsexpertise und im Bereich Data Science unterstützt, die TES als operativ tätiges Recyclingunternehmen hat den einen Teil des eher „praktischen“ Parts übernommen.

Hierbei konnten seitens TES den Konsortialpartnern Informationen und Daten sowie Testobjekte (Batteriepacks und Gerätebatterien) zur Verfügung gestellt werden. Ebenfalls war es uns möglich mit den Geräten von LiPlus und in enger Zusammenarbeit mit LiPlus sowohl in unserem Technikum in Herten als auch in unserer Batterierecyclinganlage in Rotterdam Messreihen an vorhandenen Batterien durchzuführen.

Die Zusammenarbeit wurde von unserem Projektteam ausgesprochen positiv bewertet und explizit hervorgehoben, da durch besagte gemeinsame Messungen, eine aggregierte Herangehensweise und stete Neubewertung der Testobjekte ein gutes Ergebnis erzielt werden konnte. Insbesondere auch die gegen Ende der Projektlaufzeit noch durchgeführten Messungen an gebrauchten EV-Batteriepacks von u.A. Hyundai hat das Projekt nochmals nach vorne gebracht. Ebenfalls fand ein guter und steter Kontakt durch Konsortial- und Arbeitstreffen zwischen den beteiligten Partnern statt.

II Eingehende Darstellung

1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für die TES sind die Anschaffung von Laborequipment, das für die Erweiterung der angedachten Messungen und auf Grund brandschutzrechtlicher Vorgaben notwendig wurde. Ebenfalls stellen die Personalkosten für unsere R&D Elektroingenieure und weitere im Technikum tätige Mitarbeiter einen großen Ausgabenposten dar.

Bei den Konsortialpartnern stellt sich die Situation ähnlich dar.

2. Arbeitsfortschritte und erzielte Ergebnisse während der Laufzeit

Die Beschreibung der erzielten Ergebnisse bezieht sich im Wesentlichen auf die von TES realisierten Arbeitspakete und die Zusammen im Konsortium erzielten Erfolge.

2.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Auf Grund der komplexen Zusammenhänge der Batteriealterung und der erforderlichen Infrastruktur – von speziellen Lasten und Prüfständen bis hin zu vorzuhaltende Ausrüstung für den Havariefall- wäre ein schneller Ausbau des Technikums ohne das Forschungsprojekt, die gute Zusammenarbeit mit den Partnern sowie nicht zuletzt auch den Fördermitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz nicht möglich gewesen.

Insgesamt stellt die präzise und schnelle Bewertung gebrauchter Lithium-Ionen-Batterien eine Kerntechnologie für die Ressourcenschonung durch Wiederverwendung gebrauchter Energiespeicher dar. Mit zunehmendem Marktanteil von Elektrofahrzeugen und dem zunehmenden Ausbau der regenerativen Energien wächst sowohl der Bedarf an einer Entsorgungslösung für gebrauchte Batterien aus Elektrofahrzeugen als auch der Bedarf an Energiespeichern zur Pufferung von Spitzen bei regenerativen Energien. Da die meisten Batterien nach Ende der Lebensdauer eines Fahrzeuges noch über ausreichend Restkapazität verfügen, sollten diese nach Möglichkeit einer Wiederverwendung zugeführt werden. Dies ist z.B. denkbar in Form eines Batteriespeichers zur Pufferung regenerativ erzeugter Energie.

Um eine Wiederverwendung zu ermöglichen ist eine schnelle, präzise und einfache Messung der Restkapazität entscheidend.

Durch den Partner TUM wurde im Rahmen des Projektes aus den durch alle Konsortiums Partner generierten Daten eine Datenbank mit über 20.000 korrelierten Kapazitäts- und Widerstandsmessungen generiert. Dadurch war es

möglich eine mathematische Funktion zu erstellen, die diese Korrelation, also den Zusammenhang zwischen Restkapazität und Innenwiderstand mit geringem Prognosefehler abbildet.

Da es der TES noch möglich war, real gealterte Batterien aus Hyundai-Kona Modellen zu beschaffen und hier zusätzliche Messungen durchzuführen, konnte auch nachgewiesen werden, dass dieser Zusammenhang grundsätzlich auch auf EV-Pack Ebene skalierbar ist.

Die für dieses Projekt errichteten Messtände sind im Technikum der TES werktätig im Einsatz und werden zur kontrollierten Zustandsbewertung und Entladung der Batteriepacks genutzt. Inzwischen werden die entwickelten Messverfahren und Prüfstände übergreifend eingesetzt.

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse über die Projektlaufzeit en Detail dargestellt.

2.2 Projektergebnisse Zeitraum 12/2020-12/2022

Zu Anfang des Projektes wurden bei der TES alle verfügbaren Daten gesichtet und auf ihre Anwendbarkeit für das Projekt AccuRate untersucht. Dies erfolgte im Rahmen der konsolidierten Prüfung vorhandener Datenbanken, die auch bei unserem Konsortialpartner TUM so erfolgt ist.

Hier hat die TES eine Datenbank aufgebaut, um intern die verfügbaren Daten zu sichten und zu konsolidieren. Vorhanden Akku-Test Daten aus der Wiederaufbereitung von IT-Altgeräten waren nicht spezifisch genug, um diese auch für das Projekt accuRate und die zu untersuchenden Korrelationen zu verwenden.

Dies Phase erfolgte bei der TES planmäßig, trotz eingeschränktem Zugang auf Grund der Corona-Pandemie.

Diese ist dem Arbeitspakete 2 – Zentrales Datenhandling zuzuordnen.

Aus Beständen der TES (Recycling und ITAD) wurde zunächst damit gestartet, mittels des LiPlus Gerätes Laptopbatterien zu vermessen.

Nachfolgend Beschriebene Testreihen wurden im Rahmen des **Arbeitspakets 3 Messungen an Gerätebatterien** durchgeführt.

Hier wurden insgesamt 329 Laptops des Herstellers Lenovo vermessen. Hier handelte es sich um Geräte der Modellreihen T440, T450, T460, X250, X260, X270, diese wurden mit dem LiPlus Verfahren und einem zur Verfügung gestellten Messgerät vermessen.

Da es sich um real gealterte Batterien mit verschiedensten Nutzungsszenarien handelte, wurden verschiedenste Parameter-Kombinationen getestet.

Mit Hilfe des Messgerätes konnten bis zu 10 Laptops gleichzeitig getestet werden. Es wurde in den Test zwischen externen und internen Gerätebatterien unterschieden.

Eine Zusammenfassung der Anzahl der getesteten Batterien ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Messung interne Batterien

SoC – State of Charge	Exemplare
100,90,80,70,60,50,40,30,20,10,0	74 Stück
50	118 Stück
insgesamt	192 Stück

Tabelle 2: Übersicht Messung interne Batterie



Abbildung 2: Beispiel interne Batterie

Messung externe Batterien

SoC – State of charge	Exemplare
100,90,80,70,60,50,40,30,20,10,0	128 Stück
50	183 Stück
insgesamt	311 Stück

Tabelle 3: Übersicht Messung externe Batterie



Abbildung 3: externe Batterie

Vorbereitung der Tests

Jedes zu testende Gerät war mit einem eindeutigen Barcode versehen. Vor Testbeginn wurden die Geräte systematisch vorbereitet. Dazu gehörten die Identifikation der Anzahl und Art der Batterien (intern und extern), die Einstellung der Energieoptionen unter Windows auf „Nie“ für die Displayabschaltung und Standby sowie die vollständige Entladung der externen Batterie. Diese Standardisierung war notwendig, um über die unterschiedlichen Modelltypen vergleichbare Daten zu generieren. So können z.B. Energiespareinstellung den Test negativ beeinflussen, wenn das Gerät dadurch während des Testes abschaltet.

Es wurden ebenfalls die folgenden Parameter erfasst:

- Hersteller und Modell der Batterie
- Seriennummer der Batterie
- Nennkapazität (in mAh oder Wh)
- Chemische Zusammensetzung (z. B. Lithium-Ionen)

Vorbereitung der Batterien

Die Vorbereitung der Batterien wurde in zwei Phasen durchgeführt, um die internen und externen Batterien separat zu testen:

Entladung der externen Batterie

Zunächst wurde die externe Batterie vollständig entladen. Dazu wurde der Laptop so lange betrieben, bis die externe Batterie einen Ladezustand von 0 % erreichte. Dies gewährleistete, dass die nachfolgenden Tests der internen Batterie nicht durch Restladung der externen Batterie beeinflusst wurden. Die Entladung erfolgte unter kontrollierten Bedingungen, wobei der Laptop mit einer konstanten Last betrieben wurde (z. B. durch das Abspielen eines standardisierten Videos oder das Ausführen eines Benchmarks).

Aufladung der internen Batterie

Nach der vollständigen Entladung der externen Batterie wurde die interne Batterie auf 100 % geladen. Der Ladevorgang erfolgte über das mitgelieferte Netzteil des Laptops. Nach Erreichen des vollen Ladezustands wurde die interne Batterie für 30 Minuten in Ruhe gelassen, um die chemischen Prozesse in der Batterie zu stabilisieren. Diese Ruhephase ist entscheidend, da sie eine gleichmäßige Verteilung der Ladung innerhalb der Batteriezellen ermöglicht und die Messgenauigkeit erhöht.

Entfernung der externen Batterie

Nach Abschluss der Tests der internen Batterie wurde die externe Batterie physisch aus dem Laptop entfernt. Dies erforderte das Öffnen des Batteriefachs, das bei den meisten Geräten durch das Lösen von Schrauben an der Unterseite des Laptops zugänglich war. Die Entfernung der externen Batterie stellte sicher, dass die nachfolgenden Tests ausschließlich die interne Batterie betrafen.

Durchführung der Messungen

Die Kapazitätsmessungen wurden mit dem LiPlus Battery Tester durchgeführt, einem spezialisierten Gerät zur Analyse von Lithium-Ionen-Batterien. Der Tester ermöglicht die präzise Erfassung von Parametern wie Spannung (U), Innenwiderstand (R), OCV-Werte (Open Circuit Voltage) und effektive Ladekapazität (Le). Um die Effizienz zu maximieren, wurden jeweils zehn Laptops gleichzeitig getestet.

Testprotokoll für die interne Batterie

Die Tests der internen Batterie folgten einem klar definierten Protokoll, das die Messung bei verschiedenen Ladezuständen umfasste:

100 % Ladezustand:

- Die interne Batterie wurde auf 100 % geladen und für 30 Minuten in Ruhe gelassen.
- Anschließend wurde der LiPlus Battery Tester angeschlossen, und die Parameter U, R, OCV und Le wurden gemessen.
- Die Ergebnisse wurden dokumentiert, einschließlich der Zeitstempel und der Umgebungsbedingungen (z. B. Raumtemperatur).

Schrittweise Entladung:

- Die interne Batterie wurde schrittweise auf folgende Ladezustände entladen: 90 %, 80 %, 70 %, 60 %, 50 %, 40 %, 30 %, 20 %, 10 % und 0 %.
- Für jeden Ladezustand wurde der Laptop mit einer definierten Last betrieben, bis der gewünschte Ladezustand erreicht war.
- Nach Erreichen jedes Ladezustands wurde die Batterie für 30 Minuten in Ruhe gelassen, um Spannungsrelaxationseffekte zu berücksichtigen.
- Anschließend wurden die Messungen mit dem LiPlus Battery Tester durchgeführt, und die Parameter U, R, OCV und Le wurden erneut erfasst.

Dokumentation:

- Alle Messdaten wurden in einer Datenbank gespeichert, die mit dem Barcode des jeweiligen Laptops verknüpft war.
- Zusätzlich wurden Anmerkungen zu Abweichungen oder Besonderheiten während des Tests (z. B. ungewöhnliche Spannungsabfälle) festgehalten.

Testprotokoll für die externe Batterie

Nach Abschluss der Tests der internen Batterie wurde die externe Batterie wieder eingesetzt, und die Tests wurden analog durchgeführt:

100 % Ladezustand:

- Die externe Batterie wurde auf 100 % geladen und für 30 Minuten in Ruhe gelassen.
- Die Messungen wurden mit dem LiPlus Battery Tester durchgeführt, wobei die gleichen Parameter (U, R, OCV, Le) erfasst wurden.

Schrittweise Entladung:

- Die externe Batterie wurde ebenfalls schrittweise auf 90 %, 80 %, 70 %, 60 %, 50 %, 40 %, 30 %, 20 %, 10 % und 0 % entladen.
- Nach jedem Entladeschritt folgte eine 30-minütige Ruhephase, gefolgt von der Messung mit dem LiPlus Battery Tester.

Dokumentation:

- Die Ergebnisse wurden wie bei der internen Batterie in die Datenbank eingepflegt und mit dem Barcode des Laptops verknüpft.

Umgebungsbedingungen

Die Tests wurden in einem klimatisierten Raum bei einer konstanten Temperatur von 20–25 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 40–60 % durchgeführt. Diese Bedingungen wurden überwacht, um thermische Einflüsse auf die Batterieleistung zu minimieren.

Analyse der Ergebnisse

Die gesammelten Daten wurden systematisch ausgewertet, um die Leistungsfähigkeit der Batterien zu bewerten. Die folgenden Parameter wurden analysiert:

- **Spannung (U):** Die Spannungswerte wurden über den gesamten Ladezustand hinweg aufgezeichnet, um Spannungsverläufe und mögliche Auffälligkeiten (z. B. plötzliche Spannungsabfälle) zu identifizieren.
- **Innenwiderstand (R):** Der Innenwiderstand wurde als Indikator für die Alterung der Batterie verwendet. Ein höherer Innenwiderstand deutet auf eine Verschlechterung der Batteriezellen hin.
- **OCV-Werte:** Die Open Circuit Voltage (Spannung im Leerlauf) wurde genutzt, um den Ladezustand der Batterie unabhängig von der Last zu bewerten.
- **Effektive Ladekapazität (Le):** Die effektive Kapazität wurde mit der Nennkapazität verglichen, um den Zustand der Batterie (State of Health, SoH) zu bestimmen.

Vergleich von internen und externen Batterien

Die Ergebnisse zeigten Unterschiede zwischen den internen und externen Batterien. Interne Batterien wiesen in der Regel einen geringeren Innenwiderstand auf, was auf eine bessere Pflege oder geringere Beanspruchung hinweisen könnte. Externe Batterien zeigten teilweise eine stärkere Abnutzung, was auf häufigeres Entfernen und Wiedereinsetzen zurückzuführen sein könnte.

Abweichungen und Anomalien

Einige Batterien wiesen bei niedrigen Ladezuständen (z. B. 10 % oder 0 %) ungewöhnliche Spannungsabfälle auf, die auf Zellendefekte oder Alterung hindeuten könnten. Diese Geräte wurden für eine weitere Untersuchung markiert und als Ausreißer aus den Versuchsreihen genommen.

Fazit

Die durchgeführten Kapazitätsmessungen lieferten wertvolle Erkenntnisse über den Zustand der Laptop-Batterien. Die systematische Vorbereitung und Durchführung der Tests gewährleisteten vergleichbare und zuverlässige Ergebnisse.

Insgesamt sehen wir nur geringe Unterschiede zwischen internen und externen Batterien. Unterschiede in Spannungswerten sind nicht nennenswert. Der Widerstand wiederum variiert zwischen den gemessenen Gerätebatterien sehr stark, was auf Unterschiede in der Zellqualität aber auch auf Alterungseffekte in den Gerätebatterien schließen lässt.

Insgesamt haben sowohl interne als auch externe Batterien über die verschiedenen Hersteller hinweg ähnliche Parameter, was nicht weiter verwundert, da sie für dieselbe Anwendung konstruiert wurden. Ebenfalls werden sie in ähnlichen Geräten eines Herstellers eingesetzt, sollten also naturgemäß wenig Varianz in Konstruktion und Qualität aufweisen.

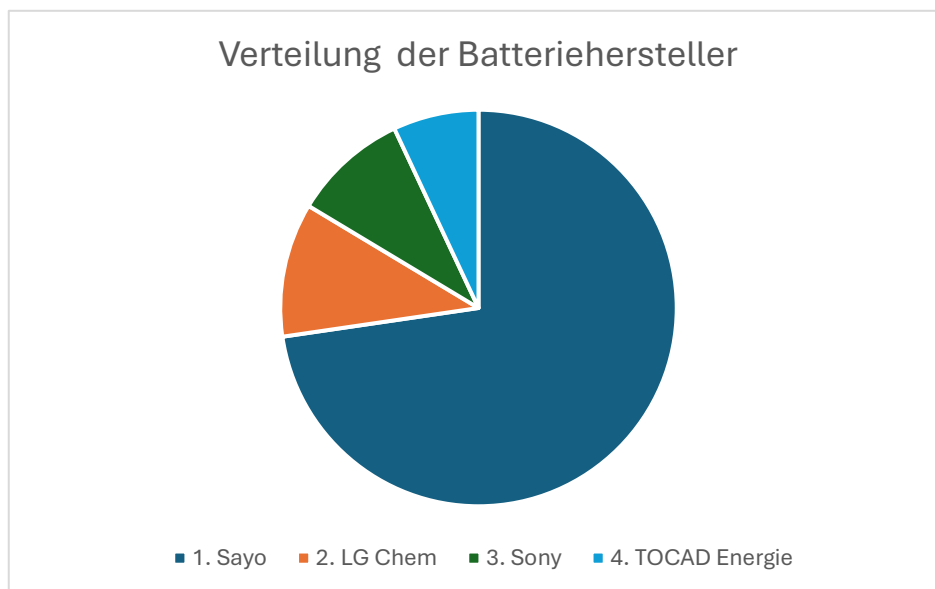


Abbildung 4: Batteriehersteller der getesteten Geräte

	Widerstand (Bereich R Ω)	Durchschnitt R Ω	Standardabweichung R Ω
Interne Batterie	0.1733 Ω bis 0.3179 Ω	0.2279 Ω	0.0416 Ω
Externe Batterie	0.1577 Ω bis 0.2786 Ω	0.2184 Ω	0.0338 Ω

Tabelle 4: Übersicht Messparameter Widerstand Gerätebatterien

Insgesamt variieren die gemessenen Innenwiderstände erheblich was auf unterschiedliches Alterungsverhalten bedingt durch unterschiedliche Nutzung oder Unterschiede in der Zellqualität schließen lässt.

Obwohl hier mittels aufwendiger Tests Ergebnisse erzielt werden konnten, wurden die Testreihen an Gerätebatterien Ende 2022 durch Konsortialbeschluss eingestellt. Denn das Aufwand-Nutzen Verhältnis wurde zunehmend als negativ für den weiteren Projektverlauf bewertet.

Die TES hatte zwischenzeitlich EV-Packs und andere besser geeignete Batterietypen zur Verfügung stellen können. Messreihen an diesen wurden auf Grund der Möglichkeit Daten zu generieren, die der Skalierbarkeit des zu entwickelnden Modelles dienen präferiert.

Da hierzu noch spezielle Prüfstände benötigt werden, wurden die bestehenden Prüfstände bei der TES sukzessive ausgebaut. Dies bezieht sich mit auf **Arbeitspaket 1.3 und 1.4**. Zu Projektanfang wurden die Gerätebatterien und vereinzelt Packs vermessen u.A. über ein Messgerät von Li-Plus. Da das Konsortium aber einen großen Mehrwert in der Ergänzung der Messreihen legt hat die TES noch in den Ausbau des Technikums investiert.

Es wurde ein Havariecontainer beschafft, der bei Bedarf eine beschädigte Lithium-Batterie aufnehmen kann, ein Übergreifen des Brandes verhindert und geflutet werden kann, um den Brand zu löschen.

Ebenso wurden Löschdecken beschafft, die genutzt werden können, um eine kritische Batterie nach draußen in Richtung Havariecontainer zu verbringen.

Ebenfalls wurde das Technikum um einige Lasten (Bidirektionales Labornetzgerät) des Herstellers Elektroautomatik erweitert für die Bereiche 0...1000V/0...80A bzw. 0...200V/ 0... 50 A. Diese sind sogenannte bidirektionale Geräte, verbinden die Funktion eines Netztes mit der einer elektronischen Last (Senke). Durch diese Geräte ist ein kontrolliertes Laden und Entladen einer Batterie möglich.

Dadurch wurde in eine zeitgemäße Ausstattung der Prüfstände investiert, die auch über die Projektlaufzeit hinaus dem technischen Stand entspricht.

Ebenfalls wurde ein spezieller Prüfstand/Behandlungsstand zur elektrischen Entladung von gefährlichen oder beschädigten Lithium-Batterien in einem Seecontainer geschaffen.



Abbildung 5: Entladecontainer für kritische Batterien

So Ausgestattet konnten die Messungen an EV-Batterien dann in der 2ten Projekthälfte erfolgen. Diese werden im Folgenden eingehender dargestellt.

2.3 Projektergebnisse Zeitraum 12/2022 – 11/2024

Im Rahmen der zweiten Projekthälfte wurden uns dankenswerterweise zwei kostenneutrale Projektverlängerungen gewährt. Es kam zu Verzögerungen in der Labornutzung in der ersten Projekthälfte auf Grund der Corona-Pandemie. In der zweiten Projekthälfte verschoben sich dann die von allen Konsortiumspartnern als wertvoll eingestuften Messungen an real gealterten EV-Batterien.

Zum einen sorgte der Russland- Ukraine Krieg sowie Nachwirkungen der Corona-Pandemie für erhebliche Lieferzeiterhöhungen für das benötigte Laborequipment zum anderen waren die Hyundai-Batterien an unserem Standort in Holland verfügbar. Desshalb musste erst eine Notifizierung d.h. Erlaubnis zum grenzüberschreitenden Transport von Abfällen nach dem Baseler Übereinkommen getroffen werden.

Die Verzögerungen entstanden im Wesentlichen am **AP3 – Messung an gealterten EV Batterien**.

Durch einen recht späten Zulauf an real gealterten Batterien konnte der Datensatz um hochrelevante Ergebnisse erweitert werden.

Es wurden verschiedene Messreihen durchgeführt, sowohl nach Industriestandard als auch nach Li-Plus verfahren. Die Industriestandardmessungen dienten der Validierung der Ergebnisse aus dem LiPlus Verfahren.

Für die Messreihen an den EV Batterien verwendet TES einen Standardsatz an Parametern, der nach Industriestandard erhoben wird um den Alterungszustand einer Batterie zu ermitteln.

Für jede Batterie wurden die folgenden Messwerten nach Industriestandard erhoben

Metadaten der Batterie	Parameter der Messreihe
Außenmaße	Spannung
Gewicht	Strom
Chemie	Bewegte Ladungsmenge pro Zeiteinheit
Nennkapazität	Bewegte Energiemenge pro Zeiteinheit
Nennspannung	Temperatur während der Entladung
Nennenergiegehalt	
Zellen in Serie geschaltet	
Zellen in Reihe geschaltet	

Tabelle 5: Übersicht Metadaten und Messdaten der Batterien

Die **Metadaten** werden benötigt, um die Batterien in Vergleich setzen zu können. Denn z.B. die Chemische Zusammensetzung der Batterie hat einen erheblichen Einfluss auf das Alterungsverhalten. Ebenso wie die Nennkapazität und der Nennenergiegehalt. Da es verschiedene Bauarten gibt wird ebenfalls erfasst ob die Einzelzellen der Batterie in Serie oder in Reihe geschaltet wurden. Alle erhobenen Metadaten haben u.U. einen Einfluss auf die später durchgeführten Testreihen. Somit ist für diese Faktoren zu kontrollieren, um Testergebnisse vergleichbar zu machen. Auch sind sie entscheidende Kriterien für alle Akteure im Konsortium und sollen diesen zugänglich gemacht werden. Die **Messreihe** besteht aus verschiedenen Datenpunkten, diese werden dann standardisiert über alle zu testenden EV- Batterien erhoben und erlauben einen Rückschluss auf den Alterungszustand der Batterie.

Grundsätzlich soll der Testprozess dann nach DIN-Norm (CC-CV Verfahren) ablaufen. Getestet wird die Kapazität (SOHc) sowie der Innenwiderstand (SOHri) der Batterie neben den oben genannten Parametern. Dies sind die am häufigsten verwendete Parameter, um den Alterungszustand einer Batterie zu bestimmen.

Ebenfalls haben andere Faktoren wie die Umgebungstemperatur einen erheblichen Einfluss auf die Messreihen, genauso wie der Ladezustand der

Batterie. So ist insbesondere der Innenwiderstand (sOHri) stark abhängig von der Zelltemperatur, der Raumtemperatur und dem Ladezustand der Batterie.

Daher wurde auch festgelegt, dass die Testung der Batterien in einem klimatisierten Raum zu erfolgen hat, da die Temperaturschwankungen $\pm 2^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten sollten, um aussagekräftige Ergebnisse zu realisieren. Ebenfalls wurde das Vorgehen auf einen Ladezustand von 50% standardisiert, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Denn in den Randbereichen des Ladezustandes $<20\%$ Kapazität und $> 80\%$ Kapazität steigt der Innenwiderstand überproportional an und ist als Maß für die Gesamtkapazität der Batterie nicht mehr sinnvoll verwendbar.

Die Lade- und Entladezyklen der Batterien werden in einem Dashboard visualisiert um auch eine optische Kontrolle der Prozesse zu gewährleisten.



Abbildung 6: Exemplarische Darstellung Entladevorgang

Die Messungen wurden auf insgesamt 5 Kanälen parallel betrieben. Die nachfolgende Grafik stellt 2 aufeinanderfolgende Messungen dar. Lila dargestellt, ist hier die Spannung, die Stromstärke wird in blau dargestellt.



Abbildung 7: Darstellung aufeinanderfolgender Messungen

Insgesamt wurden 26 Module in 3 Hyundai Kona Batterien in Gänze vermessen. Messungen wurden auf Pack und Bricks-Ebene (parallele Zellen) durchgeführt.

Jede der kompletten Batterien wurde vor Beginn der Messreihen und wenn möglich noch vor der Zerlegung in Einzelmodule auf einen Ladezustand von ca. 50% eingestellt. In diesem Bereich verhielten sich alle Batterieparameter am stabilsten, sodass die die Streuung der Messwerte erwartbar zu minimieren ist.

Nach der Zerlegung wurden immer zwei Module für eine Messreihe vorbereitet, sodass immer ein Prüfling im Test war und der zweite bereitstand, um bei Abschluss der ersten Messreihe zu übernehmen. Dieses Vorgehen sparte die Umrüstzeiten zwischen zwei Messreihen ein und vereinfachte den Ablauf während der Umrüstung erheblich, und hatte den Vorteil, dass kaum Zeit für die aufwendigen Vorbereitungen der Module von der aktiven Messzeit verloren geht.

An jedes Modul wurden Leistungs- und Messleitungen sowie verschiedene Temperatursensoren angebracht.

Da wie weiter oben schon erwähnt, sowohl die Umgebungstemperatur als auch die Temperatur der Batterie an sich die Messreihen beeinflussen können, wurden die Messvorgänge unter Temperaturüberwachung durchgeführt. Auch dies wird von der verwendeten Messtechnik der TES erfasst und der obigen Messreihe zugeordnet. Denn die Temperatur stellte in unseren Messreihen den größten Einflussfaktor in den Messreihen dar, für den es zu kontrollieren galt.

Die nächste Abbildung bildet also den Temperaturverlauf der oben dargestellten Messreihe ab. Der blaue Graph kontrolliert die Umgebungstemperatur, die

anderen Graphen stellen den Temperaturanstieg während der Messung dar. Die hierfür benötigten Temperaturfühler sind um das Modul herum angeordnet.



Abbildung 8: Temperaturkurve zur Messreihe Abb.7

Für jedes Modul wurden 2-3 Messreihen durchgeführt. Um auch hier für die Temperatur und andere verfälschende Einflüsse zu kontrollieren, musste zwischen den Einzelmessungen eine Relaxationszeit eingehalten werden, um wieder bei gleichen Ausgangsbedingungen zu starten.

Es wurden immer fünf Kanäle betrieben, sodass mit zwei Durchläufen pro Tag ca. 10 Zellen vermessen werden konnten.

Jede Messreihe des accuRate Projektes bestand aus zwei Einzelmessungen

Ein Vollzyklus zur Bestimmung der Restkapazität.

Eine Pulsgruppe mit 5C zur Bestimmung des Innenwiderstandes.

Die **Pulsgruppe** prägt einen bidirektionalen Strom ein und beobachtet die Spannungsantwort der Zelle. Diese Messung wurde zuerst durchgeführt, da diese die größte Temperaturabhängigkeit aufwies. Nach einer kurzen Erholungszeit schloss sich der **Vollzyklus** an. Dieser startete mit dem Vollladen der Zellen. Nach dem Abklingen des Ladestroms bei Erreichen der Ladeschlussspannung begann ebenfalls nach einer kurzen Ruhephase die eigentliche Kapazitätsmessung. Hierfür wurde die Zelle nach erfolgtem Vollladen auf 100% State of Charge oder auch SoH auf 0% gemäß Herstellerangaben entladen. Die dabei bewegte Ladungsmenge entspricht der entnehmbaren Restkapazität der Zellen. Durch Division dieses Messwertes durch die Herstellerangabe im Neuzustand ergibt sich eine relative Aussage über den Alterungszustand State of Health Capacity oder SoH (c).

Eine Messung nach LiPlus Verfahren als Gegenstand und Referenz des Forschungsprojektes wurde ebenfalls durchgeführt. Zusätzlich wurden alle passiven elektrischen Komponenten nach dem LiPlus Verfahren vermessen.

Insgesamt wurden so 282 individuelle Zellmessungen durchgeführt. Teilergebnisse wurden auch aus Vermessungen von 3 weiteren Hyundai-Kona Batterien sowie ca. 100 BMW Modulen gezogen.

In nachfolgender Grafik ist ein exemplarischer Versuchsaufbau dargestellt, mit dem die Messungen durchgeführt wurden.



Abbildung 9: Versuchsaufbau - Testung Hyundai Kona Zellen

Die Ergebnisse aller einzelnen Messdatenreihen liegen bei der TES zur internen Verwendung in einer No-SQL Datenbank vor, jede Messreihe kann auch grafisch aufbereitet dargestellt werden. Hierbei können alle erfassten Parameter je nach Bedarf visualisiert oder ausgeblendet werden.

Anbei ist noch einmal eine typische Visualisierung einer Messreihe eingefügt. Da die TES als Industriepartner primär die Aufgabe hatte, in der Schaffung von Messreihen zu unterstützen sowie Geräte – und EV-Batterien zu beschaffen, wurden die erzielten Daten unsere Datenbank entnommen, aufbereitet und in Form einer Excel-Datei zum Upload an unsere Konsortiumspartner übergeben. Somit konnten die Daten erfolgreich geteilt und durch die TUM dann auch noch abschließend integriert werden. Hierbei zeigte sich, dass durch die gewährte

kostenneutrale Verlängerung des Projektes durch die Integration der EV-Batterie Messreihen eine Skalierbarkeit des Modelles gezeigt werden konnte.

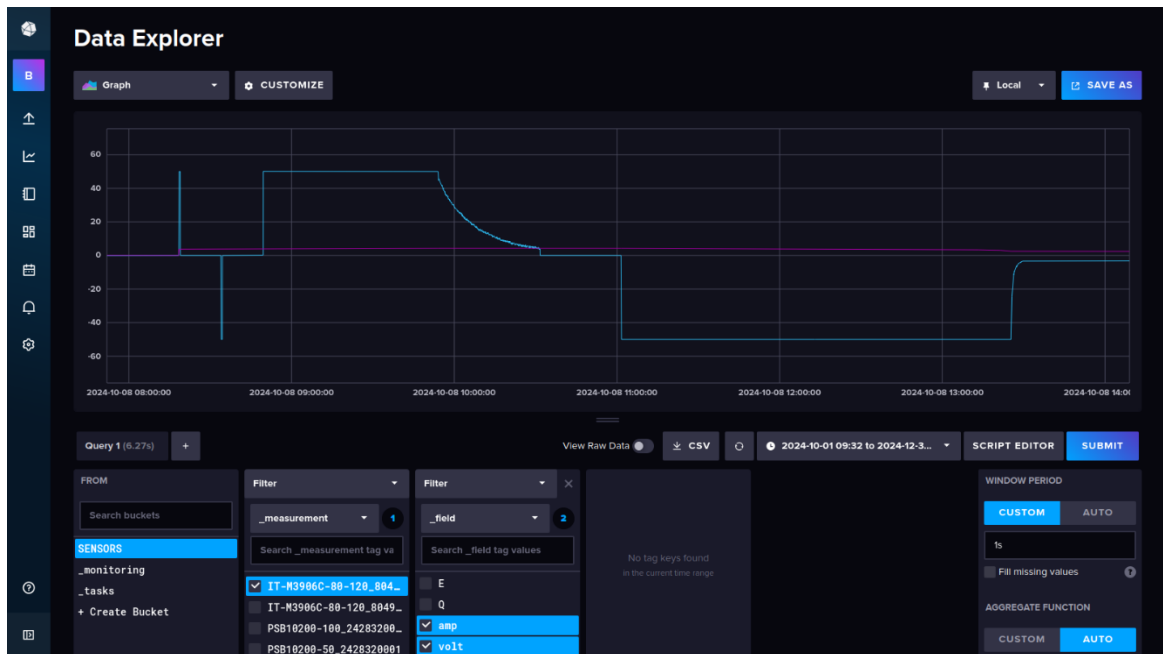


Abbildung 10: Exemplarische grafische Visualisierung einer Messreihe

Obige Grafik stellt nochmal eine exemplarische Messreihe dar. Jeder Messwert ist exportierbar und kann dann im Standardformat geteilt werden.

Abbildung 11 stellt einen exemplarischen Datensatz mit allen für unsere Konsortiumspartner relevanten Details dar, wie er dann zur weiteren Verwendung durch TES übergeben wurde.

Meta				HPPC				Cycle			
Brick	Date	Starttime	Channel	T_start [°C]	RDC,pos [mOhm]	RDC,neg [mOhm]	T_stop [°C]	T_start [°C]	C [Ah]	T_stop [°C]	
1	03.09.2024	6:09:00 AM	4	26,3	0,778	0,782	26,1	26,1	179,7	46,6	
2	03.09.2024	6:09:07 AM	5	26,3	0,769	0,782	26,1	26,1	179,3	46,6	
3	03.09.2024	6:09:13 AM	6	26,3	0,769	0,773	26,1	26,1	179,5	46,6	
4	03.09.2024	6:09:20 AM	7	26,3	0,769	0,778	26,1	26,1	179,4	46,6	
5	03.09.2024	6:09:28 AM	8	26,3	0,760	0,773	26,1	26,1	179,3	46,6	
6	04.09.2024	6:10:33 AM	4	26,5	0,742	0,769	26,6	26,6	179,1	47,5	
7	04.09.2024	6:10:41 AM	5	26,5	0,756	0,778	26,6	26,6	179,3	47,5	
8	04.09.2024	6:10:48 AM	6	26,5	0,764	0,773	26,6	26,6	179,2	47,5	
9	04.09.2024	6:10:54 AM	7	26,5	0,769	0,778	26,6	26,6	179,2	47,5	
10	04.09.2024	6:11:04 AM	8	26,5	0,724	0,733	26,6	26,6	179,0	47,5	

Abbildung 11: Exemplarischer Auszug der Messdaten

3. Relevanz der erzielten Ergebnisse und Fortschreibung des Verwertungsplanes

Die erzielten Ergebnisse konkretisieren den bisher in der Literatur angenommenen Zusammenhang zwischen Kapazität und Innenwiderstand. Dadurch ergeben sich sowohl Implikationen für Forschung und Lehre, Industrie und Business Development. Somit wurde das Endziel des Teilvorhabens erreicht, denn es kombiniert Grundlagenforschung mit industrieller Anwendbarkeit.

So stehen die am Lehrstuhl der TUM entwickelten Protokolle, Daten-Pipelines und Demonstratoren sind dauerhaft verfügbar und werden im Rahmen der Forschung und Lehre eingesetzt.

Durch die Veröffentlichungen der Ergebnisse kann dies in Fachkreisen auch als Grundlage für weitergehende Forschung auf diesem Gebiet verwendet werden.

Die Messtände sowie die gewonnen Datenreihen stehen auch im Technikum der TES weiterhin zu Verfügung und werden operativ genutzt. Die gewonnen Erkenntnisse können sowohl auf die Recyclingaktivitäten als auch auf das ITAD-Geschäft der TES adaptiert werden und sollen sukzessive ausgeweitet werden. Die schnellen Messungen und skalierbaren mathematischen Modelle sind ebenfalls prädestiniert Anwendung im second-life Markt zu finden, sowohl für Gerätebatterien als auch für EV-Packs.

Somit leistete das Projekt accuRate einen wichtigen Beitrag sowohl zur Ressourcenschonung durch Wiederverwendung als auch zur Energiespeicherstrategie indem es eine effiziente Alternative zur bisher genutzten aufwendigen Vollzyklusmessungen darstellt. Durch die Gestaltung einer Datenbank werden u.A. auch Nutzung der Messergebnisse zur Schaffung digitaler Zwillinge der Batterien denkbar. Dies erleichtert dann bspw. den Wissenstransfer entlang der Battery-Supply Chain, vom Hersteller über Aufbereiter, Anbieter von Batteriespeichersystemen und schlussendlich Recyclern.

4. Erzielte Fortschritte innerhalb des Forschungsgebietes durch Dritte während der Projektlaufzeit

Im Laufe des Vorhabens sind uns keine anderen relevanten fachlichen Ergebnisse auf diesem Gebiet bekannt geworden.

Es gibt andere Forschungsprojekte, die auf ähnliche Zielstellung bspw. Zustandsbewertung von Batterien abzielen, diese haben aber dann kein Messverfahren zum Ziel, sondern bspw. die Schaffung eines digitalen Marktplatzes für Second-Life Batterien oder auch Batterien zum Recycling.

Schlussendlich wird sich das schnellste und effizienteste Messverfahren durchsetzen. Ebenfalls eine Rolle spielt dabei, eine möglichst einfache Umsetzung die idealerweise in der Praxis (bspw. Autowerkstätten) nur auf Auslesen des Fehlerspeichers und anderer Daten über vorhandenen OBD-Schnittstellen beruht. Dies wurde auch durch Präsentation des Messverfahrens in mehreren CARA-Gremien deutlich.

5. Übersicht erfolgter oder geplanter Veröffentlichung des Ergebnisses

Da die TES-AMM als Industriepartner im Projekt beteiligt war, ist von unserer Seite keine Veröffentlichung der erzielten Ergebnisse im Sinne einer Publizierung in einem Fachjournal oder eines Posters auf einer Konferenz geplant.

Stattdessen erfolgt gemäß Förderrichtlinie eine Veröffentlichung des Forschungsberichtes/Schlussberichtes im TIB (Leibniz-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek) durch einen Upload im Repositorium Naturwissenschaften und Technik.

Seitens der Konsortialpartner insb. TUM sind uns die folgenden Veröffentlichungen bekannt, die auch auf Ergebnissen der TES als Praxispartner beruhen.

M. Fischer, M.J. Brand, A. Karger, M.R. Gomez, M. Rehm, J. Natterer, A. Jossen (2025): How Degradation of Lithium-Ion Batteries Impacts Capacity Fade and Resistance Increase: A Systematic, Correlative Analysis. Review in: Journal of Power Sources. Preprint: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5208980>

Sowie eine geplante Veröffentlichung unter dem Arbeitstitel:

M. Fischer: (Arbeitstitel) - Impact of Internal State of Health and External Operating Conditions on Impedance and Resistance Measurements in Fresh and Aged Commercial Lithium-Ion Batteries

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technikum TES-AMM Central Europe GmbH.....	3
Abbildung 2: Beispiel interne Batterie.....	13
Abbildung 3: externe Batterie	14
Abbildung 4: Batteriehersteller der getesteten Geräte	18
Abbildung 5: Entladecontainer für kritische Batterien.....	20
Abbildung 6: Exemplarische Darstellung Entladevorgang	22
Abbildung 7: Darstellung aufeinanderfolgender Messungen	23
Abbildung 8: Temperaturkurve zur Messreihe Abb.7	24
Abbildung 9: Versuchsaufbau - Testung Hyundai Kona Zellen.....	25
Abbildung 10: Exemplarische grafische Visualisierung einer Messreihe	26
Abbildung 11: Exemplarischer Auszug der Messdaten	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete.....	6
Tabelle 2: Übersicht Messung interne Batterie.....	13
Tabelle 3: Übersicht Messung externe Batterie.....	13
Tabelle 4: Übersicht Messparameter Widerstand Gerätebatterien.....	19
Tabelle 5: Übersicht Metadaten und Messdaten der Batterien.....	21