

Testsystem für Traktionsbatterien

Kurztest zur modellbasierten Bewertung des SoH von Li-Ion Batterien beim AC-Laden

Christoph Seifert, Andreas Heinz,
Sophia Caroline Grund, Dr.-Ing Prof. Hans-Christian Reuss , FKFS
Mathias Thiele, Fraunhofer, Dr.-Ing. Tatjana Dabrowski, Fraunhofer IEE
Tobias Stürmlinger, Dr.-Ing. Thomas Freudenmann,
Dr.-Ing Mohanad El-Haji, EDI GmbH

christoph.seifert@fkfs.de

Abstract: Die Batterie bestimmt als Schlüsselkomponente entscheidend die Reichweite, sowie die Lebensdauer von Elektrofahrzeugen. Ebenso ist diese Fahrzeugkomponente der wesentliche Kostentreiber bei Elektro- und PlugIn-Fahrzeugen. Eine kostengünstige, schnelle und vor allem herstellerunabhängige Bewertung der Traktionsbatterie ist essentiell für die Reichweitenabschätzung und die Bestimmung des Fahrzeugrestwertes. Als Basis für die Bewertung soll ein Ladevorgang beim AC-Laden dienen, bei dem ein bestimmtes Ladeprofil vorgegeben wird. Ein Diagnosegerät soll die physikalischen Größen des Akkupacks erfassen, das Ladeprofil vorgeben und für eine Auswertung in ein Backend streamen. Anhand des Verhaltens des Strom- und Spannungsverlaufs soll mittels einem Batteriemodell eine Auskunft über den Gesundheitszustand der Traktionsbatterie gegeben werden. Hierzu wird die Bestimmung des State-of-Health (SoH) auf Basis detaillierter elektrochemischer Batteriemodelle realisiert. Als Interaktion zum Benutzer sowie zur Darstellung des Ergebnisses wird ein Frontend bereitgestellt.

1 Motivation

Der Anteil an Elektromobilität in Deutschland weist in den letzten Jahren ein annäherndes exponentielles Wachstum auf[sta22] und der Anteil an batterie-elektrischen Fahrzeugen (engl. BEV) und PlugIn-Hybrid Fahrzeugen (engl. PHEV) ist im Jahr 2022 jeweils um 1.3% gewachsen. Bei diesen Fahrzeugen ist ein wesentlicher Kostenpunkt der Akkumulator, der bis zu 50% der Fahrzeugkosten ausmacht. Dessen Alterungszustand beeinflusst maßgeblich die maximale Reichweite und damit den Wiederverkaufswert des Fahrzeugs. Daher ist es umso wichtiger deren Zustand, also der State-of-Health (SoH) des Akkupacks zu erfassen und unabhängig zu bestimmen.

Im Rahmen des Projekts "LionAID" wird ein Diagnosesystem zur unabhängigen, schnellen und exakten Bewertung des SoH entwickelt. Das Gesamtsystem wird in vier Bereiche unterteilt, die in der Abbildung 1 dargestellt sind. Der erste Teil, der InLine Controller (ILC), fungiert als steuerbare Infrastruktur zur Manipulation der Ladeleistung und somit als Basis für den Bewertungsalgorithmus. Der ILC wird vom Diagnosetester gesteuert, dieses System übernimmt die Datenerfassung vom Fahrzeugparameter und die Kommunikation zum Backend. Im Backend werden die Daten aufbereitet und dem Bewertungsalgorithmus zur Verfügung gestellt. Dieser ermittelt den SoH des gesamten Akkupacks.

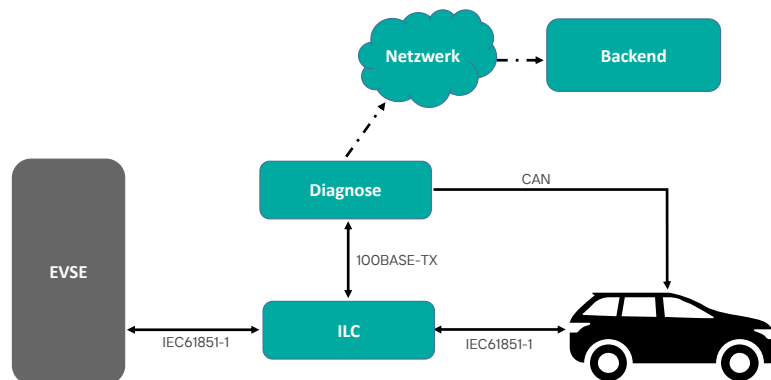


Abbildung 1: LionAid - Systemübersicht

2 InLine Controller

Der InLine Controller fungiert in dieser Anwendung als Man-in-the-Middle und simuliert zum einen die Funktionalität des Fahrzeugs und zum anderen die der Infrastruktur. Dabei wird die Kommunikation nach der IEC61851-1 [IEC] emuliert. Eine vereinfachte Übersicht ist in Abbildung 2 dargestellt. Der ILC trennt hierbei die Kommunikation

zwischen dem Fahrzeug und der Ladestation vollständig auf. Dieser Freiheitsgrad erlaubt eine Manipulation der Grenzwerte und somit der Steuerung des Ladeverhaltens.

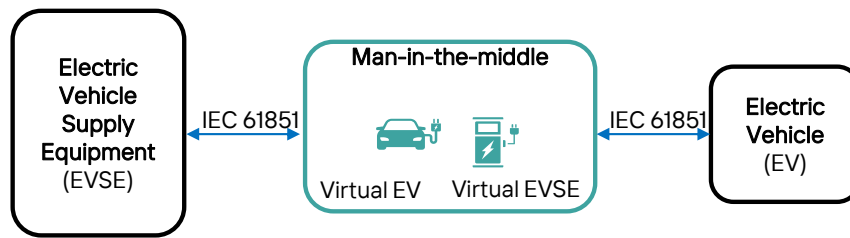


Abbildung 2: LionAid - ILC

Die Kommunikation nach der IEC61851-1 ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Ladesäule stellt zu Beginn einen konstanten 12 V Pegel am Communication Pilot(engl. CP)-Pin zur Verfügung. Sobald ein Fahrzeug angesteckt wird, verändert sich dieser Pegel auf 9V und die Ladesäule stellt eine Pulsweitenmodulation (PWM) mit einer Frequenz von 1 kHz bereit. Das Fahrzeug hat die Möglichkeit Energie anzufragen, indem es den Pegel auf 6 V bzw. 3 V zieht. Anschließend muss die Ladesäule in einem definierten Zeitbereich Energie zum Laden bereitstellen.

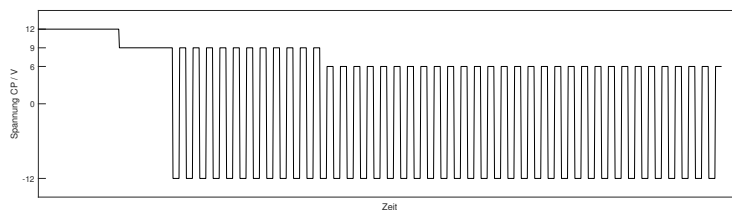


Abbildung 3: LionAid - ILC

Der maximal zulässige Strom wird mittels des Duty Cycles D kommuniziert. Die Berechnung des maximal zulässigen Stroms erfolgt mit der Formel (1). Die Vorgabe des Stroms erfolgt durch die Ladesäule. In diesem Fall wird mit der virtuellen Ladesäule kommuniziert, die dein Ladeprofil dynamisch vorgeben kann.

$$Current = \begin{cases} 10\% < D \leq 85\% & D \% \cdot 0,6A \\ 85\% < D \leq 97\% & (D \% - 64) \cdot 2,5A \end{cases} \quad (1)$$

Für die Bewertung des Akkupacks werden Sprünge von der Ladeleistung vorgegeben. In der Abbildung 4 ist ein Ladeprofil für den Bewertungsalgorithmus aufgezeichnet. Links dargestellt ist das vorgegebene Ladeprofil mit 6 Ladezuständen mit einer Gesamtdauer von 35 Sekunden. Rechts ist ein aufgezeichnetes Ladeprofil mit Strom (gestrichelte Linie) und Spannung, die vom Fahrzeug per Diagnose abgefragt wurden.

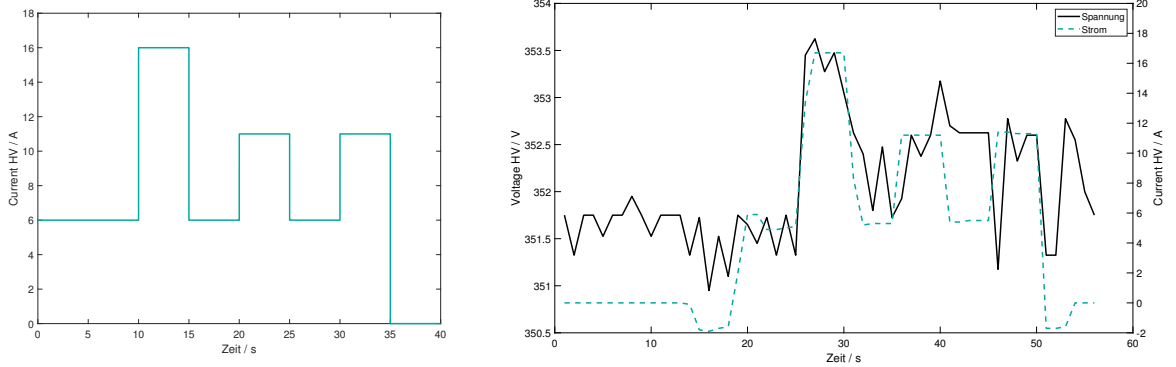


Abbildung 4: Ladeprofil - Links Soll-Profil Rechts aufgezeichnetes Profil

3 Diagnosesystem

Zur Erfassung der für die Bewertung der Traktionsbatterie erforderlichen Messdaten wie Strom, Spannung und Temperatur der Traktionsbatterie wird im Rahmen des Projektes eine Cloud-gestütztes Diagnose-System entwickelt. Als zentrales Element zwischen Cloud, Fahrzeug, ILC und Ladestation dient das Diagnosesystem zur Erfassung der Signale des Fahrzeugs, sowie zur Benutzerführung und Steuerung des gesamten Prozesses und der Kommunikation zwischen allen Systemen.

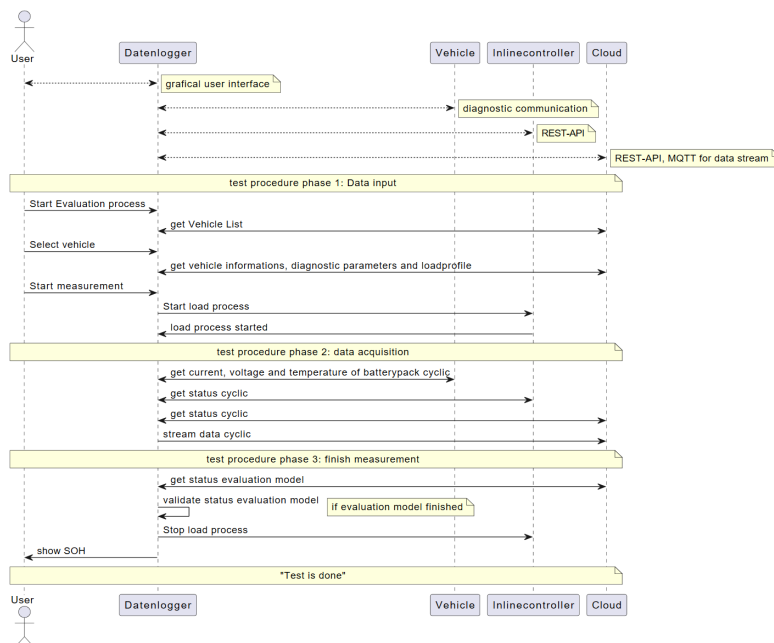


Abbildung 5: Konzept und Aufbau des Bewertungsprozesses sowie der Kommunikationskette

Die Erfassung der relevanten Messsignale erfolgt mittels Diagnose-Kommunikation im

Request-Response-Verfahren. Hierfür unterstützt das Diagnosesystem alle gängigen Diagnoseprotokolle für eine Kommunikation auf dem CAN-Bus. Die für die Kommunikation mit den Steuergeräten notwendigen Parameter werden durch umfangreiche Untersuchungen und Analysen des Kommunikationsverhaltens mit den Steuergeräten des Fahrzeuges vom FKFS abgeleitet und werden von der Cloud dem Diagnose-System zur Verfügung gestellt. Die Übertragung der Diagnose-Parameter und das vom ILC benötigte Ladeprofil erfolgt mittels von der Cloud bereitgestellter REST-API, gesteuert durch das Diagnosesystem. Das Ladeprofil wird dem ILC prozessabhängig vom Datenlogger mittels REST-Kommunikation bereitgestellt [ISOa] [ISOb] [ISOc]. Die erfassten Signale werden vom Diagnosesystem in Echtzeit an die Cloud gestreamt, in der die Daten einem Bewertungsmodell zugeführt werden. Die Cloud stellt hierfür einen Streaming-Service zur Verfügung. Der Aufbau und das Konzept des Bewertungsprozesses sowie der Kommunikationskette wird in nachfolgender Abbildung 5 veranschaulicht. Das Diagnosesystem dient dabei als zentrales Element zur Prozessführung, Kommunikation zwischen allen Beteiligten und Steuerung des Bewertungsprozesses.

4 Backend - Datenstreaming

Die EDI GmbH zeichnet sich mit dem EDI hive IoT Framework als Plattform-Ökosystem aus und kann die Aufgaben Prozessüberwachung, -steuerung und -optimierung durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in EDGE- und cloudbasierten Infrastrukturen übernehmen.



Abbildung 6: EDI hive IoT Framework mit offenen Schnittstellen

Das EDI hive IoT Framework bietet diverse Software-Bausteine, die auf Open-Source Code beruhen und untereinander kommunizieren können und offene Schnittstellen zu anderen Systemen bietet. So werden die Daten des Diagnosesystems vom FKFS per Streampipes skalierbar und sicher in die EDI hive Umgebung gestreamt und dort mit dem "Rohdaten"-Service visualisiert. Die gestreamten Rohdaten einer Fahrzeugmessung wer-

den online durch die, vom Fraunhofer IEE bereitgestellten und in die EDI hive Umgebung eingebunden, elektro-chemischen Batteriemodelle evaluiert und der SoH sowie die Restlebensdauer der Fahrzeugbatterie ausgegeben. Weitere Batterie-Kenngrößen können in einer Expertenansicht ebenfalls betrachtet werden. In der Applikation “Analysen“ kann für die erfassten Fahrzeuge der berechnete SoH angezeigt werden.



Abbildung 7: EDI hive IoT Framework mit vier Applikationen zur Analyse und Verwaltung der Fahrzeugbatterien

Der SoH und die Restlebensdauer können für jede Messung abgerufen und als Report heruntergeladen werden. Eine zentrale Rolle spielt hierbei die semantische Vernetzung von Analyse- und Rohdaten. Experten können für weitere Erkenntnisse direkt zwischen den Applikationen und Daten navigieren, um weitere Erkenntnisse über den Batteriezustand ableiten zu können. Für die in Abbildung 6 exemplarische Fahrzeugmessung werden Temperatur, Spannung und Strom im EDI hive IoT Framework dargestellt. Des Weiteren stehen zwei weitere Applikationen zur Verwaltung zur Verfügung. Unter “Fahrzeuge“ werden die erfassten Fahrzeuge verwaltet, unter “Batteriemodell Parameter“ können die Batteriemodelle angepasst bzw. aktualisiert werden, um der fortlaufenden Weiterentwicklung im Fahrzeug- und Batteriemarkt gerecht zu werden. Zusätzlich findet ein semantisches Mapping statt, weshalb das Analysetool ohne Schulung, intuitive angestoßen und treffsicher durchgeführt werden kann. Um sicher zu stellen, dass die Funktionalität stets gewährleistet ist, meldet das auf Icinga2-basierendes Monitoring über den Messenger Telegram zu jeder Zeit ob die bereitgestellten Services online sind. So kann die Verfügbarkeit im Anwendungsfall jederzeit garantiert werden.

5 Batteriebewertung

5.1 Elektrochemische Modellierung

Das Fraunhofer IEE entwickelt elektrochemische Modelle zur Simulation und Emulation von Energiespeichern. Die elektrochemische Modellierung basiert auf der Beschreibung physikalischer und elektrochemischer Prozesse innerhalb eines Energiespeichers, in diesem Fall der Lithium-Ionen-Batterie (siehe Abbildung 8), über mathematische Gleichungen [NTA14],[DN95]. Die Zustandsvariablen, d. h. die dynamischen Parameter, aus de-

nen der Zustand der Batterie abgeleitet werden kann (beispielsweise Konzentrationen und Überpotentiale), liegen im Regelfall nur als partielle Differentialgleichungen vor, die über komplexe numerische Verfahren gelöst werden müssen. Das vom Fraunhofer IEE entwickelte Softwarepaket BaSiS (Battery Simulation Studio) stellt sowohl die Beschreibung der internen Prozesse über mathematische Gleichungen als auch die benötigten numerischen Lösungsverfahren bereit. Der Vorteil der elektrochemischen Modellierung liegt im detaillierten Einblick in die Batteriezelle und in das dynamische Verhalten mikroskopischer Größen. Hierdurch sind die daraus abgeleiteten makroskopischen Batteriegrößen, wie Ladezustand, Strom, Spannung, Temperatur, etc., von enorm hoher Präzision. Ihr großer Nachteil besteht im oft höheren Rechenaufwand im Vergleich mit vereinfachten Modellen wie Ersatzschaltbildern.

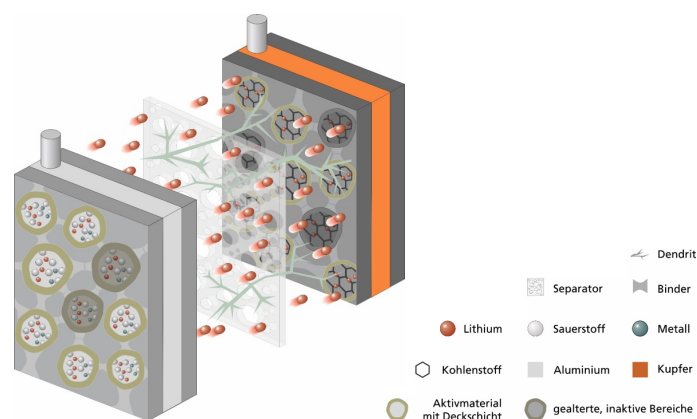


Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle und ihrer mikroskopischen Größen.

Zusätzlich zur mathematischen Beschreibung und den zugehörigen Lösungsverfahren benötigen elektrochemische Modelle experimentell ermittelte konstruktive und charakteristische Parameter, die die simulierte Batterie beschreiben. Ein Großteil der Parameter basiert auf den verwendeten Materialien (Dichten, Porositäten, Dicken, Wärmekapazitäten, Leitfähigkeiten, etc.) und kann der Literatur oder einfachen Messungen entnommen werden. Weitere charakteristische Parameter (Doppelschichtkapazitäten, Diffusionskoeffizienten, etc.) werden in einem Parametrierungsprozess über elektrochemische Impedanzspektroskopie im Zeit- und Frequenzbereich bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt.

5.2 Alterung von Lithium-Ionen-Batterien

Aufgrund der Beschreibung interner Prozesse und mikroskopischer Größen kann innerhalb der elektrochemischen Modellierung zusätzlich die Degradation dieser Größen über die Zeit modelliert werden. Mit ausreichend Kenntnis über die Vorgänge des Alterns können die Degradationsprozesse über mathematische Gleichungen beschrieben und simuliert werden [LPL⁺14],[KB16]. Innerhalb der Lithium-Ionen-Batterie ist der maßgebliche Prozess, der die Kapazität der Batterie über die Zeit schwinden lässt, das Wachstum der Solid-Elektrolyte-Interphase (SEI). Die SEI ist eine natürlich auftretende Schutzschicht zwischen Anode und Separator, die sich über eine Reaktion des metallischen Li-

thiums und dem Elektrolyten ausbildet und eine weitere Zersetzung des Elektrolyten verhindert. Die Verdickung der SEI über die Lebensdauer der Batterie führt jedoch zu einer Zunahme des Innenwiderstandes der Batterie. Neben der Erhöhung des Innenwiderstandes und des Verlustes von Lithium kommt es bei dieser Reaktion zur Entstehung von Gas, welches Elektrolyt von der Oberfläche der Elektrode verdrängt und damit die reaktive Oberfläche reduziert. Ein weiterer Mechanismus, der zur Reduktion der reaktiven Oberfläche und damit zur Reduktion der Kapazität der Batterie führt, ist der Kontaktverlust des aktiven Materials der Elektrode durch mechanischen Stress (Brüche des porösen Aktivmaterials). Über die Modellierung dieser Alterungsmechanismen innerhalb von BaSiS und ihres Einflusses auf die mikroskopischen Zustandsgrößen kann der daraus abgeleitete Alterungszustand der Batterie SoH bestimmt werden.

Auch im Fall der Alterung werden experimentelle Parameter benötigt, die den Alterungsprozess der simulierten Batterie charakterisieren. Zur Ermittlung dieser Parameter werden sowohl kalendarische (Lagerung bei unterschiedlichen Temperaturen) als auch zyklische (Zyklisierung bei unterschiedlichen Temperaturen) Alterungstests durchgeführt.

5.3 Zustandsbestimmung über Optimierung und Restlebensdauer

Mit Hilfe des Softwarepaketes BaSiS inklusive Alterungsmechanismen und der experimentell parametrisierten Lithium-Ionen-Batterie, die im betrachteten E-Fahrzeug vorliegt, kann der Alterungszustand dieser bestimmt und ihre Restlebensdauer geschätzt werden. Die Bestimmung des Alterungszustandes findet in folgenden Schritten statt:

1. Über ein kurzes vordefiniertes Testladeprofil wird ein Spannungsprofil vom E-Fahrzeug aufgezeichnet und ggf. geglättet (Gauß-Filter).
2. Ausgehend von einer initialen Konfiguration der Alterungsparameter und dem zugehörigen simulierten Spannungsprofil werden die Alterungsparameter solange variiert bis beide Spannungsprofile (simuliertes und aufgezeichnet) innerhalb der vorgegebenen Toleranz übereinstimmen (siehe Abbildung 9).
3. Basierend auf den optimalen Alterungsparametern werden SoH und ohmscher Widerstand der Batterie bestimmt und ausgegeben.

Die verwendete initiale Konfiguration der Alterungsparameter ist kritisch für die Dauer der Optimierung. Um den Optimierungsprozess um ein Vielfaches zu beschleunigen, werden aufgezeichnete Spannungsprofile für unterschiedliche Konfigurationen von Alterungsparametern innerhalb sinnvoller Parametergrenzen in einer Datenbank hinterlegt. Dies ist möglich, da das Testladeprofil vorgegeben und bekannt ist, so dass unterschiedliche Spannungsprofile für verschiedene Parameterkonfigurationen im Voraus simuliert und bereitgestellt werden können. Üblicherweise werden hier ca. 1 Millionen Simulationen gespeichert. Bevor der eigentliche Optimierungsprozess begonnen wird, wird das aufgezeichnete Spannungsprofil mit zuvor simulierten Profilen unterschiedlicher Parameterkonfigurationen abgeglichen. Die Parameterkonfiguration der am besten passenden Spannungskurve dient als Ausgangskonfiguration für eine Feinjustierung über den Optimierungsalgorithmus.

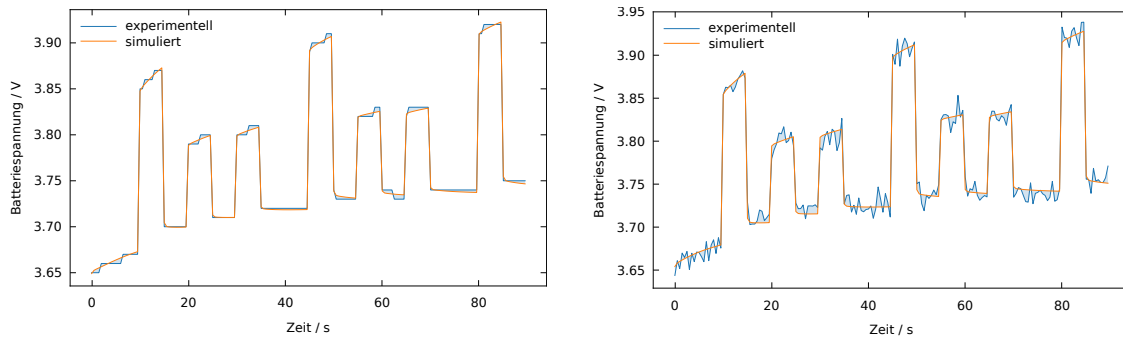


Abbildung 9: Optimales Spannungsprofil mit und ohne Rauschen über die Variation der Alterungsparameter.

Die Restlebensdauer der Fahrzeugbatterie wird über eine Heuristik bestimmt. Die Heuristik basiert auf der Annahme einer wurzelförmigen Abhängigkeit des SoH von der Zeit, d. h. $SoH(t) = 100\% - const \cdot \sqrt{t}$ ausgehend von einem Neuzustand von $SoH(t = 0) = 100\%$. Für die Fitfunktion werden Neuzustand, der aktuell bestimmte SoH sowie (falls vorhanden) vorherige SoH-Messungen herangezogen. Die gefittete SoH-Funktion kann beliebig in die Zukunft extrapoliert werden, die Zuverlässigkeit der Vorhersage nimmt jedoch mit zunehmender Zeit ab. Der Fehler des extrapolierten SoH wird numerisch über die Fehlerfortpflanzung der Alterungsparameter und den Fit des fehlerbehafteten SoH bestimmt. Ein Beispiel für eine derartige Extrapolation mit zugehörigem Fehlerbereich ist in Abbildung 10 zu finden. Mit Hilfe der Extrapolation kann abgeschätzt werden, zu welchem Zeitpunkt die Fahrzeugbatterie einen kritischen SoH-Wert erreicht (im Allgemeinen zwischen 70 - 80%).

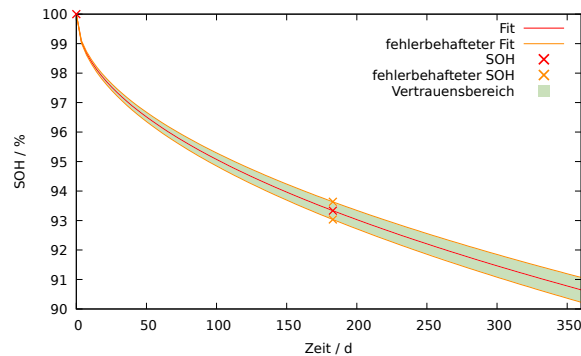


Abbildung 10: SoH-Fit und Extrapolation.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Papers wurde dargestellt, dass eine Bestimmung des SoH anhand der Manipulation des Ladeprofil bestimmt werden kann. Das Fahrzeug akzeptiert Ladesprünge und reagiert zeitnah auf diese. Hiermit kann das Batteriemodell mit den Rohdaten versorgt und so relevante Batteriegrößen bestimmt werden. Dieses System kann als Basis für eine Erweiterung nach der ISO15118, für DC-Ladevorgänge, dienen. Dabei muss die Kommunikation zwischen der Ladesäule und Fahrzeug erweitert werden.

Literatur

- [DN95] Marc Doyle und John Newman. The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems. *Electrochimica Acta*, 40, 1995.
- [IEC] IEC. IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system: International standard.
- [ISOa] ISO 14229. Road vehicles — Unified diagnostic services (UDS).
- [ISOb] ISO 14230. Road vehicles — Diagnostic communication over K-Line (DoK-Line).
- [ISOc] ISO 15765. Road vehicles — Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN).
- [KB16] Christian Kupper und Wolfgang G. Bessler. Multi-Scale Thermo-Electrochemical Modeling of Performance and Aging of a LiFePO₄/Graphite Lithium-Ion Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 164, 2016.
- [LPL⁺14] Lin Liu, Jonghyun Park, Xianke Lin, Ann Marie Sastry und Wei Lu. A thermal-electrochemical model that gives spatial-dependent growth of solid electrolyte interphase in a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 268, 2014.
- [NTA14] J. Newman und K.E. Thomas-Alyea. *Electrochemical Systems*. The ECS Series of Texts and Monographs. Wiley, 2014.
- [sta22] statista. Elektromobilität in Deutschland, 30.05.2022.