

Ansatz zur Zustandsdiagnose von Lithium-Ionen-Batterien im Betrieb

Mechanische Alterungs-detection in Lithium-Batterien

M. Graaf, F. Hoheisel

ZUSAMMENFASSUNG Die Zustandsbewertung von Batterien vom Gesamtsystem bis hin zur Zellebene stellt vor allem außerhalb des Laborumfelds weiterhin eine Herausforderung dar. Die in der Zelle ablaufenden Alterungsmechanismen überlagern sich auf komplexe Weise, was eine eindeutige Ursachenanalyse erschwert. Neben den elektrischen Charakterisierungsmethoden bieten die mechanischen Ansätze vielversprechende Möglichkeiten, bislang ungenutztes Potenzial zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit und Transparenz zu erschließen.

STICHWÖRTER

Messtechnik, Sensoren, Batteriefertigung

Mechanical Aging Detection in Batteries

ABSTRACT The assessment of battery condition, from the overall system to the cell level, remains a challenge, particularly outside the laboratory environment. The aging mechanisms occurring within the cell are intricately superimposed, making a clear identification of their causes difficult. In addition to electrical characterization methods, mechanical approaches offer promising opportunities to unlock previously untapped potential for enhancing data availability and transparency.

1 Zustandsbestimmung als Lösung für Herausforderungen in der E-Mobilität

Die stetig wachsende Zahl der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (EVs) spiegelt die Erfolge in einer global stattfindenden Verkehrswende und deren zugrundeliegenden Technologien wider. Zentrale Hemmnisse dieser Disruption – etwa Reichweitenbegrenzungen und Lade-Infrastruktur – wurden bereits sukzessive reduziert, so dass andere Herausforderungen in den Vordergrund rücken: die Erhöhung von Ladegeschwindigkeiten und die langfristige Wertstabilität der Fahrzeuge – zwei zunächst voneinander unabhängige Fokusthemen, die jedoch eng miteinander verzahnt sind.

Im Gegensatz zum Verbrenner (ICE), kann die Wertbestimmung bei EVs direkt mit dem Zustand einer einzelnen Komponente ins Verhältnis gesetzt werden. Die Traktionsbatterie übt einen signifikanten Einfluss auf Wertfaktoren wie Leistungsfähigkeit, Nutzungsdauer und Sicherheit der Fahrzeuge aus und bedingt als kritische Kernkomponente damit maßgeblich deren wirtschaftliche Attraktivität. [1, 2] In diesem Zusammenhang liegt in der fortschreitenden Degradation von Batterien sowie in deren Nutzung aktuell eine der größten Herausforderungen. Das als „Alterung“ (aging) bezeichnete Phänomen beeinflusst unmittelbar die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge und äußert sich in einer direkten Abnahme von Reichweite und durchschnittlicher Ladegeschwindigkeit. [3]

Allgemeinhin wird die Batterie-Alterung in zwei Hauptmechanismen unterteilt: die zyklische Alterung, die durch Lade- und Entladevorgänge verursacht wird, sowie die kalendarische

Alterung, die auch ohne Nutzung auftritt und vor allem durch externe Faktoren wie Temperatur oder Ladezustand beeinflusst wird. Beide Mechanismen führen zu strukturellen und chemischen Veränderungen innerhalb der Batteriezellen, die sich langfristig in einer reduzierten Kapazität, einer erhöhten Innenwiderstandsentwicklung und damit in einer insgesamt verringerten Leistungsfähigkeit äußern. [4]

Vor diesem Hintergrund gewinnt die erweiterte Zustandsbewertung von Batterien zunehmend an Bedeutung. Während elektrische Charakterisierungsmethoden bereits etabliert sind, rücken physikalische Alternativansätze in den Fokus von Forschung und Entwicklung. Insbesondere der Analyse bisher kaum betrachteter mechanischer Zellparameter wird das Potenzial zugeschrieben, tiefgreifendere Einblicke in die Degradationsmechanismen der Batterie-Alterung zu ermöglichen und das Zellverständnis zu erweitern. [5] Um die aktuellen Herausforderungen in der Zustandsanalyse und die Erschließung möglicher Nutzungspotenziale neuer Detektionsmethoden zu erheben, wurde am Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen eine Industriestudie zur Implementierung mechanischer Zellcharakterisierung im Batterielebenszyklus vorgenommen. Beteiligt waren führende Unternehmen der Zell- und Systementwicklung, der Batterieprüfung-, -zertifizierung und -datenanalyse sowie Automobilproduzenten. Der Messung irreversibler Zustandsänderungen mittels mechanischer Indikatoren wird mittelfristig eine hohe Relevanz für die Entwicklung innovativer Zelldesigns und Ladestrategien sowie der Rest-Performance-Bestimmung von Batterien zugeschrieben. [6] Langfristig wird durch den Informationszuwachs ein vielver-

sprechender Beitrag zur Erhöhung der Markttransparenz bei Traktionsbatterien und Elektrofahrzeugen erwartet.

2 Forschungsstand zur fortschreitenden Degradation von Lithium-Ionen-Batterien

Als zentrales Bewertungskriterium wird der „State of Health“ (SoH) als Verhältnis zwischen dem Ursprungszustand und dem Status quo herangezogen. Dabei ist eine direkte Bestimmung der Zustände aufgrund der Komplexität des Systems „Zelle“ bis dato nicht möglich [7]. Für eine Quantifizierung wird in der Praxis daher häufig die Abweichung der Batteriekapazität oder die des Innenwiderstands der Zelle im Vergleich zum Ausgangszustand (Nennkapazität; Nenninnenwiderstand) gemessen und das Verhältnis als Indikator für den „State of Health“ interpretiert: [8]

$$SoH = \frac{Q(t)}{Q_N} \times 100 ; Q(t) = \text{Kapazität}, Q_N = \text{Nennkapazität} \quad (1)$$

$$SoH = \frac{R(t)}{R_N} ; R(t) = \text{Innenwiderstand}, R_N = \text{Nenninnenwiderstand} \quad (2)$$

Der Grund für die Verwendung von Kapazität und Innenwiderstand als Alterungsindikatoren begründet sich in den direkten, negativen Auswirkungen auf die Rest-Performance der Batterie durch die fortschreitende Degradation ihrer Zellkomponenten. Dabei lassen sich die beiden nicht analog interpretieren, sondern müssen bei einer Bewertung zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Während der Alterung fällt die Ist-Kapazität immer unter die Nennkapazität, während der Innenwiderstand stets über den Nenninnenwiderstand (ausgenommen: Kurzschluss) hinauswächst. In der Literatur existieren zudem weitere Varianten der SoH-Bestimmung, die jedoch seltener Anwendung finden. [9]

Die Batterie-Alterung wird in einen zeitabhängigen Anteil (kalendarische Alterung) und einen nutzungsabhängigen Anteil (zyklische Alterung) unterteilt. Dabei können für Lithium-Ionen-Batterien mehrere zentrale Alterungsmechanismen in beiden Anteilen vorgefunden werden:

1. Verlust von Elektrodenaktivmaterial (LAM)
2. Zersetzung des Elektrolyten (LLI)
3. Abscheidung von Lithium insbesondere auf der Anode („Lithium Plating“ oder Schichtwachstum)

Während kalendarische Prozesse vor allem über das Zelldesign beeinflusst werden können, sind für nutzungsbedingte Alterungerscheinungen auch noch Betriebsbedingungen und Nutzungsprofile zu berücksichtigen. [10]

Allgemein lässt sich unabhängig von der Ursache bei den meisten Alterungsprozessen die Ablagerung von Material auf den Elektroden und/oder die Entstehung von Gasen durch chemische Reaktionen beobachten. Beides führt langfristig zu den beschriebenen Kapazitätsverlusten und zu Leistungsminderungen durch Innenwiderstandswachstum. So kann der Verlust aktiven Materials („loss of active material“) sowohl zyklisch als auch kalendrisch bedingt sein. Insbesondere der Abbau von Kathodenmaterial aufgrund dauerhaft hoher Ladzustände kann zur verstärkten Oxidation des Elektrolyten an der Kathode und damit in der Folge zur Freisetzung von Sauerstoff führen. [11]

Auch die Zersetzung des Elektrolyten („loss of lithium inventory“) kann sowohl in der kalendarischen Alterung – durch das Auftreten unerwünschter Nebenreaktionen – als auch in der zyklischen Alterung, beschleunigt durch zu hohe Ströme und

Spannungen, auftreten. Dabei werden Zersetzungprodukte des Elektrolyten an den Elektroden abgeschieden, wodurch sich der Gesamtinnenwiderstand der Zelle erhöht, was wiederum eine erhöhte Wärmeentwicklung der Zelle zur Folge hat. Zudem werden häufig Gase freigesetzt, die dann in der Zelle verbleiben. [12]

Unter „Lithium Plating“ wird überwiegend ein Phänomen der zyklischen Alterung verstanden, bei dem hohe Ladeströme die Abscheidung und Ablagerung von Lithium auf der Anode begünstigen. Diese Ablagerungen verhindern eine vollständige Wiedereinlagerung von Lithium in die Anodenstruktur und reduzieren auf diese Weise die nutzbare Kapazität. In Extremfällen kann ein durch „Lithium Plating“ ausgelöstes dendritisches Wachstum der Ablagerungen den Separator durchstoßen und somit zu internen Kurzschlüssen und hohen Sicherheitsrisiken führen. Außerdem kann das Phänomen auch bei hohen Ladezuständen und niedrigen Temperaturen ohne eine direkte Nutzung auftreten, so dass teils auch eine kalendarische Komponente argumentiert werden kann. [13]

Im Gegensatz zu den anderen Effekten ist das Wachstum der „Solid Electrolyte Interphase“ (SEI) in der Batterietechnik zunächst erwünscht. Die Phase bildet sich am Ende des Produktionsstadiums der Zellen an der Anode und dient als Schutzbarriere zur Vermeidung unkontrollierter Nebenreaktionen mit dem Elektrolyten. Diese Schutzbarriere bildet sich im Verlauf der Zeit durch chemische Reaktionen jedoch immer weiter aus, so dass der Ladungstransfer gehindert und die nutzbare Kapazität gesenkt wird. Analog zum „Lithium Plating“ kann auch hierbei eine Kurzschlussgefahr entstehen. [14] Eine Übersicht der verschiedenen Alterungsmechanismen sowie deren Wirkstätten ist in **Bild 1** dargestellt.

Sowohl bei der Quantifizierung des „State of Health“ als auch bei der Bestimmung von Alterungsursache und -prozess spielt die Wahl der Detektionsmethode eine entscheidende Rolle. Derzeit existieren vielversprechende Ansätze zur Batteriecharakterisierung mit unterschiedlichen Vorteilen und Nachteilen. Bei den meisten davon wird ein Indikatorprinzip verfolgt. [5] Gesicherte Rückschlüsse lassen sich in der Regel jedoch nur über Post-Mortem-Analysen gewinnen, wobei die Zelle ihre Funktionsfähigkeit verliert und unbrauchbar wird. Die zentrale Herausforderung bei der Zustandsdiagnose bleibt demnach die quantifizierbare Charakterisierung in-situ, das bedeutet: während des Betriebs ohne Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und die Leistungsbereitschaft der Batterie. Diese Herausforderung intensiviert sich beim Verlassen der Labor-Ebene. [15]

3 Batteriealterung als Treiber innovativer Methoden der Zustandsdiagnose

Die Methoden zur Batteriecharakterisierung lassen sich in vier physikalische Bereiche unterteilen, **Bild 2**:

1. Chemisch: Analyse der chemischen Zusammensetzung und Veränderung innerhalb der Zelle
2. Elektrisch: Analyse von Strom- und Spannungsparametern
3. Thermisch: Analyse von Temperaturverteilung und -entwicklung innerhalb der Batterie
4. Mechanisch: Analyse mechanischer Belastungen und struktureller Veränderungen

Dabei ermöglicht die Erfassung mechanischer Parameter Rückschlüsse auf die irreversible Entwicklung des Zellstapelwachstums

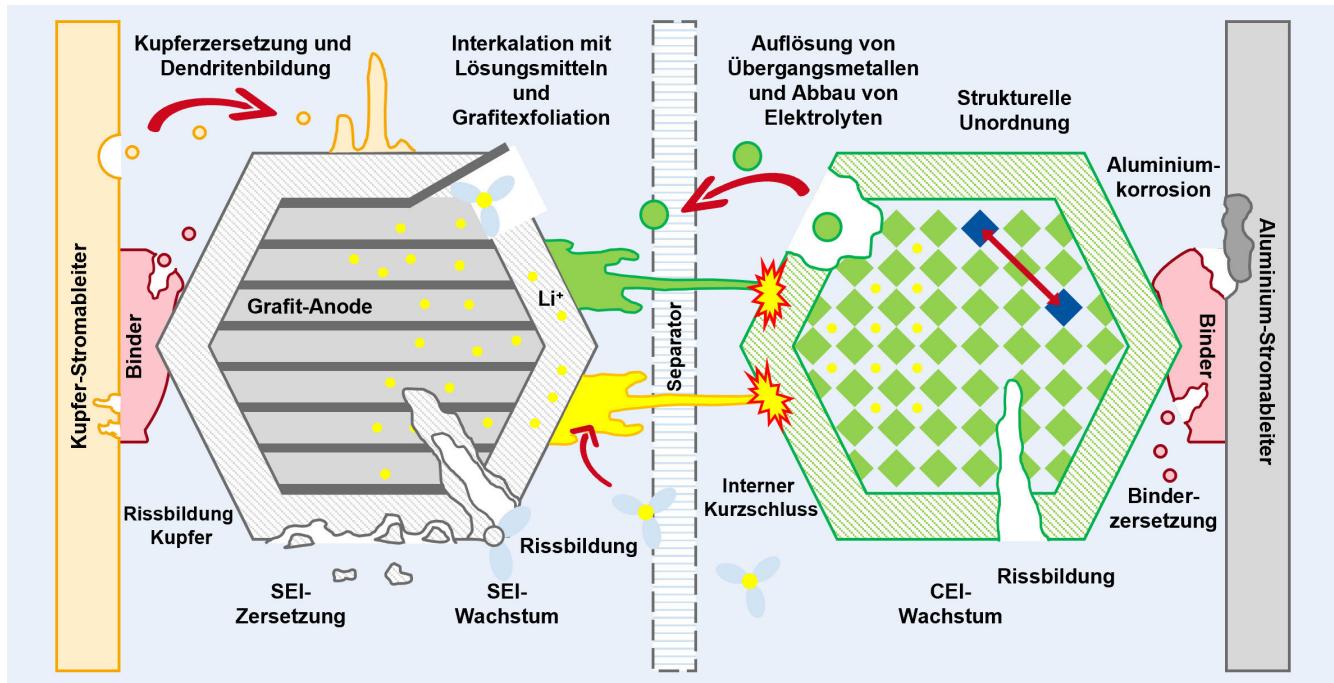


Bild 1. Übersicht der verschiedenen Alterungsmechanismen [12]. Grafik: RWTH Aachen University PEM

und der Gasproduktion innerhalb der Zelle, die beide aus Alterungsprozessen der Zelle resultieren. [16]

Für eine ganzheitliche SoH-Bestimmung sollte eine vollständige Charakterisierung der Batterie unter Berücksichtigung aller vier Bereiche vorgenommen werden, da die verschiedenen Alterungsprozesse aus komplexen Wechselwirkungen bestehen (siehe Bild 2). In der Praxis wird diese Ganzheitlichkeit aufgrund unterschiedlicher Herausforderungen jedoch kaum verfolgt.

Dabei bildet eine umfassende Charakterisierung der Zelle den Grundstein für die spätere Systemauslegung. Je präziser das Verhalten der Einzelzelle beschrieben wird, desto gezielter kann die Abstimmung und Optimierung des Gesamtsystems erfolgen. Dies ist vor allem deshalb wichtig, da selbst geringe Abweichungen in der Bestimmung von Zellparametern langfristig erhebliche Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit, Effizienz und Lebensdauer des Systems haben können.

Oft sind jedoch genau diese Informationen für nachgelagerte Wertschöpfungsteilnehmer der Batterieproduktion – beispielsweise „Original Equipment Manufacturer“ (OEMs) – zu den Zelleigenschaften stark begrenzt, da häufig Interessenskonflikte bei der Informationstransparenz zwischen Produzenten und Weiterverarbeitung vorliegen. Um bestehende Informationsdefizite zu kompensieren, lässt sich infolgedessen ein Phänomen beobachten, bei dem sich OEMs zu Zellproduzenten (etwa Tesla, VW) und Zellproduzenten zu OEMs (zum Beispiel BYD) entwickeln. So lassen sich die Zellen ohne Bemühungen um Konversion direkt gezielt für deren spezifische Anwendungen optimieren. Für OEMs bietet das darüber hinaus den Vorteil, Mehraufwände bei Prüfung und Charakterisierung der extern produzierten Zellen minimieren zu können. Dennoch ist auch bei den eigenen produzierten Zellen stets eine Charakterisierung zur Zustandsbestimmung und zustandsabhängigen Verhaltensprognose erforderlich, sodass Produzenten und Weiterverarbeiter die Integration möglichst effizienter und präziser Charakterisierungsmethoden in ihre Betriebsabläufe anstreben.

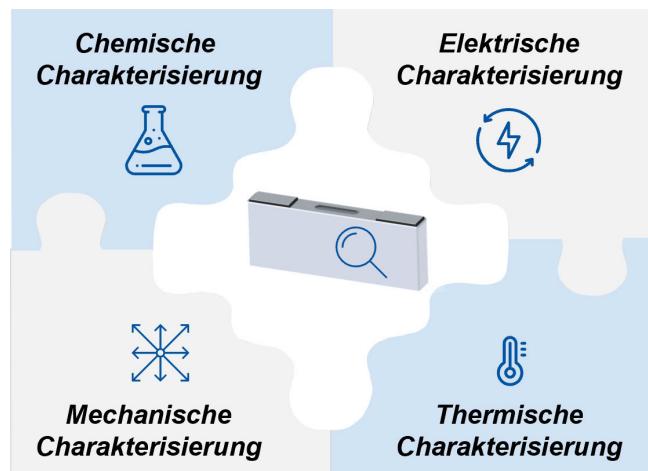


Bild 2. Charakterisierungsmöglichkeiten einer Batterie.
Grafik: RWTH Aachen University PEM

Für die meisten Charakterisierungsmethoden wird ein Referenzmodell benötigt, das häufig um eine Simulation der Batterie und ihrer Umgebung ergänzt wird. Da das simulativ approximative Zellverhalten stets auf Annahmen und physikalischen Grundgleichungen basiert, müssen die Modelle immer durch den Abgleich von Messdaten ergänzt, optimiert und validiert werden. [17] Daher finden bereits während der Zellentwicklung umfassende Versuchsreihen zur Erfassung von Leistungsfähigkeit, zur Identifikation von Parametergrenzen und zur Analyse des Zellverhaltens statt, so dass Datenblätter und Referenzmodelle erstellt werden können. Der Datenbedarf variiert dabei je nach Simulationsziel und Charakterisierungsmethode deutlich und bildet ein wesentliches Entscheidungskriterium bei der Wahl der Methoden.

Dennoch können Simulationsmodelle und Laborprüfungen nur einen begrenzten Teil des realen Zellverhaltens abbilden. Da sich die Unvorhersehbarkeit der tatsächlichen Nutzung nie voll-

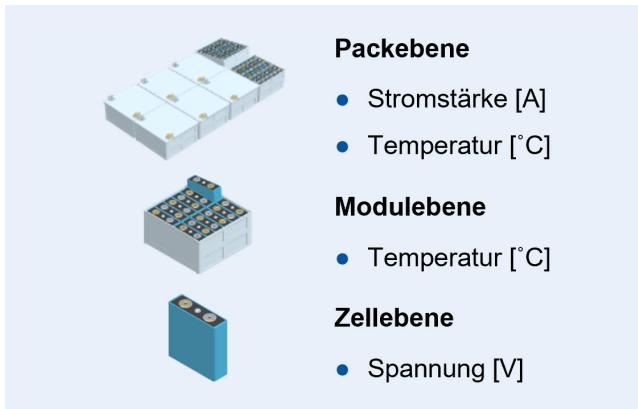


Bild 3. Sensoren in Traktionsbatterien. *Grafik: RWTH Aachen University PEM*

ständig berücksichtigen lässt, besteht eine zentrale Herausforderung der Praxis im Umgang mit der Diskrepanz zwischen Simulations-, Labor- und Felddaten. So können Batterien unter Laborbedingungen zwar definierten Lastprofilen unterzogen und systematisch analysiert werden, im realen Fahrzeugbetrieb wirken jedoch zahlreiche variable Einflussfaktoren auf die Zelle – etwa individuelle Nutzungsprofile und unterschiedliche Umweltbedingungen. Eine langfristig steigende Abweichung zwischen dem durch Simulationen und Messungen prognostizierten Verhalten und realen Betriebsdaten ist die Folge, so dass Diagnosen zur aktuellen Rest-Performance und Restlebensdauer im Anwendungskontext ebenfalls mit steigender Unwissenheit über deren Einsatzzeit behaftet sind. [18]

Eine zentrale Ursache für die Abweichung liegt in den ungewollten Nebenreaktionen innerhalb der Zelle, die in Abschnitt 2 beschrieben wurden. Insbesondere die teilweise noch unbekannten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge verhindern eine vollständige Ausschöpfung des real vorliegenden Potenzials der Batterieleistung. Das Zusammenspiel verschiedener Einflussgrößen führt zu komplizierten und komplexen Wirkungsketten, die das Äquilibrium der Batterie maßgeblich beeinflussen. Um einen langfristig sicheren Betrieb der Batterie zu gewährleisten, wird bei der Systemauslegung ein Sicherheitspuffer vorgesehen [19]. Er dient dazu, auftretende Degradationsmechanismen zu kompensieren, was jedoch gleichzeitig zu einer Reduktion des maximal verfügbaren Leistungspotenzials der Batterie führt. Eine suboptimale Ressourcenausnutzung und reduzierte Gesamteffizienz des Batteriesystems sind das Resultat.

Im Gegensatz zu den umfangreichen Charakterisierungsmöglichkeiten im Labor, bestimmt während der Nutzungsdauer der jeweilige Anwendungskontext die Möglichkeiten zur Batteriediagnostik. Dabei muss vor allem im Fahrzeug mit deutlichen Einschränkungen gearbeitet werden. Während die Batterien im Labor in speziell entwickelten Prüfständen analysiert werden können und eine individuelle Auswahl und Platzierung von Sensorik möglich ist, erfolgt die Bewertung des Zustands der Traktionsbatterie unter strengen Restriktionen von Raum, Gewicht und Kosten. [20]

Aufgrund dieser Restriktionen differenzieren sich Art und Umfang der Datenaufnahme zumeist nach der Integrationsebene im Batteriesystem. So werden individuelle Spannungszustände auf Zellebene erfasst, Temperaturmessungen hingegen jedoch häufig nur an wenigen ausgewählten Positionen auf Modul- und Packebene. Dies führt dazu, dass die Aussagefähigkeit über Tempera-

turzustände und -veränderungen pauschalisiert ist und kritische Zustände in Zellen aufgrund von Latzenen antizipiert werden müssen. Die Messung des Stromflusses wird wegen der Bauteilgröße und -kosten der Sensorik in der Regel nur auf Packebene erfasst. Die Unterscheidung der Integrationsebene bei der Datenaufnahme zeigt, dass im Fahrzeugbetrieb eine Aussage über den tatsächlichen Zustand der Batterie stets mit einer Unschärfe behaftet ist, so dass Labordaten zum Beifall herangezogen werden müssen. Lokale Effekte bis auf Einzelzelniveau lassen sich kaum erfassen. Auffällig ist zudem, dass mit den vorhandenen Sensoren lediglich zwei von vier möglichen Charakterisierungsmethoden umgesetzt werden, **Bild 3**.

Während elektrische Charakterisierungen mittels Strom- und Spannungssensoren sowie thermische Charakterisierungen mit Hilfe von Temperatursensoren realisiert werden können, bleiben chemische und mechanische Charakterisierungen im eingebauten Zustand der Batterie unberücksichtigt. [5] Dies führt zu einem Verlust potenziell wertvoller Messgrößen für die SoH-Bestimmung, was die Genauigkeit der Zustandsbewertung einschränkt.

Mittelfristig liegt in der chemischen Charakterisierung von Traktionsbatterien noch eine erhebliche Herausforderung. Die dafür zur Verfügung stehenden Methoden sind normalerweise invasiver Natur, die einen aktiven Eingriff in das Innenebenen der Zelle erfordern. Darüber hinaus lassen sie sich nur mit einem vergleichsweise hohen Kostenaufwand realisieren. Daher wird diese Charakterisierung vorrangig in der frühen Phase der Zellentwicklung angewendet, um grundlegende elektrochemische Eigenschaften zu analysieren und Materialoptimierungen vorzunehmen. Der Einsatz im Serienfahrzeug bleibt zum aktuellen Zeitpunkt weiterhin unwahrscheinlich.

Im Gegensatz dazu muss eine mechanische Charakterisierung nicht zwangsläufig in der Zelle stattfinden. Um Rückschlüsse auf die mechanischen Belastungen der Zellkomponenten durch darin erfolgende (erwünschte) reversible und (unerwünschte) irreversible Prozesse ziehen zu können, werden unterschiedliche Indikatoren zur Detektion genutzt. Die Aussagefähigkeit der Messungen über den Zellzustand ist dabei stark von der Messposition, dem genutzten Indikator und der Art der Messung abhängig. Ein in der Forschung und in der Praxis häufig diskutierter mechanischer Parameter zur Differenzierung zwischen reversiblen und irreversiblen Zustandsveränderungen ist der Zellinnendruck, der die Ausdehnung der Batterie erfassen soll, die sich während ihrer Einsatzzeit vollzieht. Die dafür notwendige Sensorik ist in den Dimensionen Volumen und Kosten mit heutzutage eingesetzten Temperatursensoren in Batteriesystemen vergleichbar.

Allgemein wird unter der sogenannten Zellatmung („swelling“) die reversible Ausdehnung und Reduktion der Elektroden während des Lade- und Entladevorgangs der Zelle durch die Interkalation und De-Interkalation von Lithium-Ionen verstanden. Unter Idealbedingungen kehrt dabei das Schichtniveau der Elektroden stets in den initialen Ausgangszustand zurück. Die irreversible Komponente dieser Zellausdehnung entsteht währenddessen durch unerwünschte Nebenreaktionen infolge der in Abschnitt 2 beschriebenen Mechanismen, die als Degradation (beispielsweise „Lithium Plating“ oder SEI-Wachstum) zu einer dauerhaften Volumen- und Innendruckzunahme der Zelle führen, **Bild 4**. [21] Mit der Erfassung der irreversiblen Zellausdehnung lässt sich eine Detektion der kritischsten Alterungseffekte und den damit einhergehenden Kapazitäts- und Leistungsverlusten der Batterie realisieren. Die Messung des Druckniveaus als Indikator der Aus-

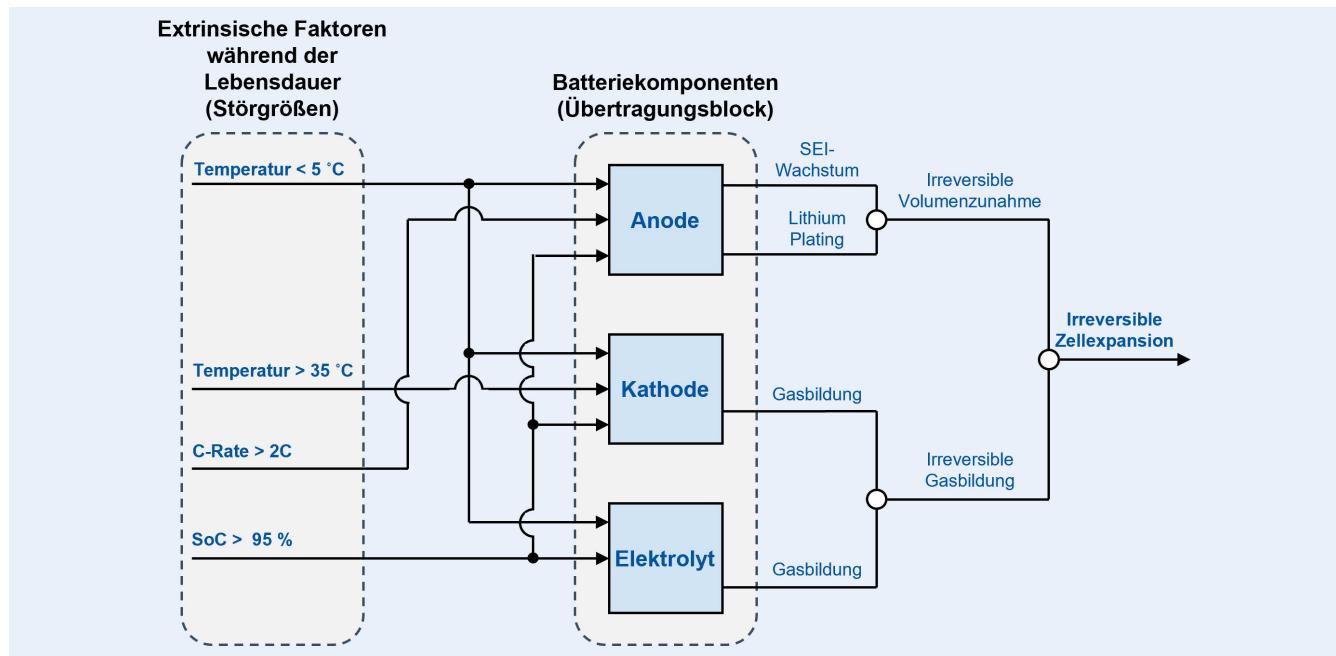


Bild 4. Größen der Einflüsse auf die irreversible Zellexpansion. *Grafik: RWTH Aachen University PEM*

dehnung bietet mit der Überwachung des irreversiblen Druckanstiegs in der Zelle die Möglichkeit, den Gesamalterungszustand über die unterschiedlichen Mechanismen hinweg zu detektieren und zu quantifizieren. [22]

Trotz der durch Forschung nachgewiesenen Relevanz des Drucks als Alterungsindikator existieren derzeit keine etablierten Detektionspraktiken, die gezielt zur Messung oder Überwachung des Drucks in Traktionsbatterien oder Stationärspeichern implementiert sind. Die Gründe dafür liegen vor allem in den aktuell vorherrschenden Kostenrestriktionen für diese Systeme. Die Industriestudie konnte jedoch zeigen, dass prinzipiell ein großes Interesse an der Erfassung des Zelldrucks existiert, der in den im Markt befindlichen Batterien vorliegt. So könnte Zell- und Systementwicklern zufolge eine Echtzeitüberwachung des Drucks wertvolle Informationen über den aktuellen Zustand von Batteriezellen bereitstellen und somit die bestehenden Möglichkeiten für eine frühzeitige Detektion sicherheitsrelevanter Zustände und kritischer Alterungsprozesse erweitern. Außerdem könnte die Integration von Drucksensoren den Systementwicklern ermöglichen, ihre Batterien auf Basis physischer Zellveränderungen auszulegen, potenzielle Schwachstellen frühzeitig zu identifizieren und sowohl das Zell- als auch das Systemdesign daran zu optimieren. Außerdem würde den Inverkehrbringen und Betreibern der Systeme eine präzisere Anpassung von Betriebsstrategien und damit eine Optimierung der Batterieleistung und -lebensdauer ermöglicht, **Bild 5**.

Unabhängig vom jeweiligen Anwendungsfeld oder von den möglichen Potenzialen, herrschte bei den Teilnehmenden der Studie weitgehende Einigkeit darüber, dass die Erfassung des Zelldrucks grundsätzlich eine sinnvolle Ergänzung zur bestehenden Sensorik darstellt. Lediglich in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit äußerten sich 29 % der Befragten unentschlossen und zeigten sich unsicher darüber, ob die potenziellen Vorteile die entstehenden Mehrkosten tatsächlich rechtfertigen.

4 Mechanische Alterungsindikatoren für die Batteriezustandsprognose

Trotz kontinuierlich steigender Verkaufszahlen batterieelektrischer Fahrzeuge („Battery-Electric Vehicles“; BEV) haben potenzielle Kunden weiterhin große Vorbehalte hinsichtlich einer Anschaffung. Ein wesentlicher Grund dafür liegt in einer verbreiteten Skepsis gegenüber der Antriebsbatterie als zentraler Wert- und Leistungskomponente des Fahrzeugs. Auf der Leistungsebene werden vor allem Ladezeiten und Reichweite als maßgebliche Einflussfaktoren für die Alltagstauglichkeit von BEVs erachtet, **Bild 6**.

Dabei ist der direkte Vergleich mit konventionellen „Verbrennern“ („Internal Combustion Engine Vehicles“; ICEV) noch eine bedeutsame Hürde bei der Kaufentscheidung. Da der Abstand zwischen ICEVs und BEVs in der Leistungsbereitstellung aufgrund kontinuierlicher Innovation rasant schrumpft, ist perspektivisch aber von einem vollständigen Abbau dieser Hürde auszugehen.

Im Gegensatz dazu sind zukünftige Entwicklungen auf der Wertebene der Fahrzeuge nicht ohne Weiteres abzusehen. Die Leistungseigenschaften der Traktionsbatterie beeinflussen nicht nur die Alltagstauglichkeit von BEVs, sondern ebenfalls deren Wert im Neu- und Gebrauchtzustand. So haben der im Zeit- und Nutzungsverlauf sinkende „State of Health“ der Batterie und die damit verbundene Abnahme der Leistungsfähigkeit den größten wirtschaftlichen Einfluss auf die Kaufentscheidung eines Elektrofahrzeugs, **Bild 7**.

Potenzielle Käufer eines BEVs sehen sich derzeit noch mit hohen Anschaffungskosten konfrontiert, die im Konflikt mit der Wertstabilität der Fahrzeuge stehen. Zwar wird erwartet, dass die Kaufpreise nach Abschluss der notwendigen Transformationsprozesse stetig sinken werden, jedoch sind positive Implikationen für den Restwert dadurch nicht absehbar. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in dem hohen Wertanteil der Traktionsbatterie als funktional essenzieller Einzelkomponente des Fahrzeugs selbst.

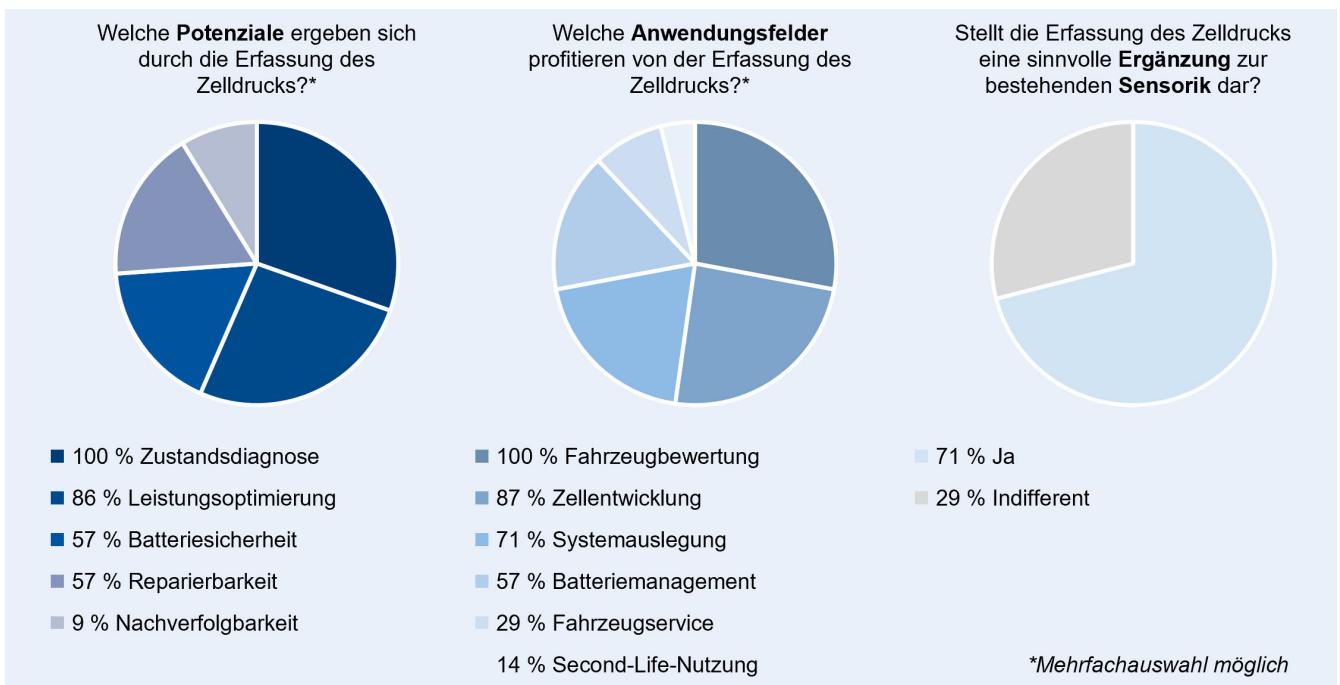


Bild 5. Studienergebnisse hinsichtlich der Relevanz und Erfassung des Zelldrucks. Grafik: RWTH Aachen University PEM

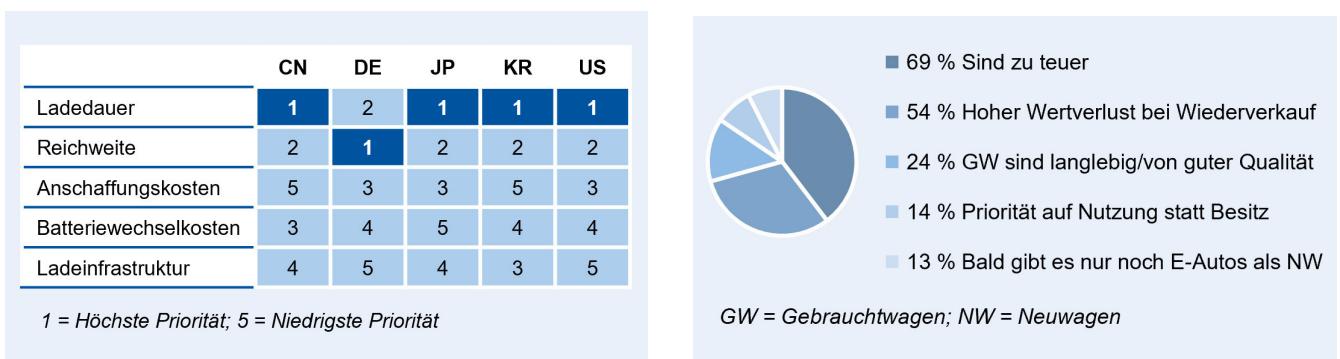


Bild 6. Allgemeine Gründe gegen die Anschaffung eines E-Fahrzeugs [23]. Grafik: RWTH Aachen University PEM

Das Batteriesystem macht je nach Marke und Modell bis zu 30 % der Gesamtkosten aus, so dass eine starke Leistungsminderung oder ein Defekt bis zum wirtschaftlichen Totalschaden des Fahrzeugs führen kann.

Für Hersteller ergibt sich damit ein Zielkonflikt bei der Auslegung der Batteriesysteme, denn die Leistungseigenschaften und die Batterielebensdauer (bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit) bedingen sich gegenseitig. Dies gilt insbesondere für die Ladeleistung. So führt eine Erhöhung des Ladestroms beispielsweise durch Schnellladen zwar zu einer Verkürzung der Ladezeiten, aber gleichzeitig auch zu einer beschleunigt ablaufenden Degradation und SoH-Abnahme durch die in Abschnitt 2 gezeigten Effekte. [25] Für die Nutzenden macht sich dies durch eine langfristige Verringerung der Reichweite und durch auf Dauer verlangsamte künftige Ladeprozesse bemerkbar, Bild 8. Die leistungsabhängige Degradation von Batterien zwingt Hersteller also dazu, einen Kompromiss zwischen der Ladefähigkeit und der Lebensdauer zu finden, um den Ansprüchen an Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nutzungskomfort gerecht werden zu können.

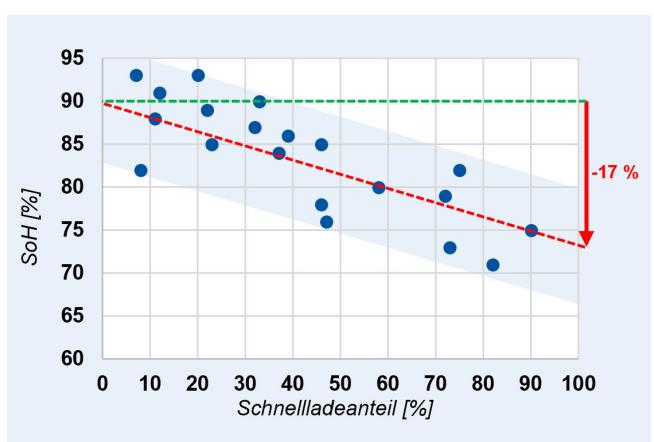


Bild 8. „State of Health“ nach 180 000 km in Abhängigkeit vom Schnelllade-Anteil [26]. Grafik: RWTH Aachen University PEM

Aus der PEM-Studie wurde deutlich, dass derzeit vier technische Herausforderungen bei der Wertentwicklung von BEVs im Markt existieren. Zum einen fehlt es an umfassenden Daten zum Nutzungsverhalten und zur damit verbundenen Zustandsentwicklung von in Verkehr gebrachten Traktionsbatterien. So zeigen beispielsweise neue Studien auf diesem Gebiet, dass der real vorliegende „State of Health“ von Traktionsbatterien häufig über den angenommenen Werten liegt [27]. Eine weitere Herausforderung besteht in der Pauschalität der eigentlichen Zustandsdiagnose: Aufgrund der in Abschnitt 3 gezeigten Restriktionen bei der Datenaufnahme im Fahrzeug wird der „State of Health“ der Batterie meist nur auf System- oder Subsystem-Ebene erfasst. Der tatsächliche Zustand von Einzelzellen wird dabei durch elektrische Indikatoren abgeschätzt. Dieser Umstand führt auch dazu, dass gezielte Reparaturen im Fehlerfall erschwert werden können. Eine Prognose der Zustandsentwicklung der Traktionsbatterie gestaltet sich daher als eine der größten Herausforderungen. Die Extrapolation basiert zumeist auf Modellen oder Simulationen, die im besten Fall auf Einzeltestdaten und Labor-Erkenntnissen beruhen. Es fehlt jedoch an erweiterten Bewertungsmöglichkeiten, die Veränderungen in der Batterie über die Zellspannung hinaus erfassen, protokollieren, analysieren und damit die Vorhersagegüte optimieren können. Konsequenz der fehlenden Datenverfügbarkeit, der pauschalen Zustandsdiagnose und der ungenauen Zustandsprognose bei Traktionsbatterien ist ein Mangel an Transparenz bei der Wertermittlung gebrauchter Elektrofahrzeuge. Diese letzte Herausforderung führt zur attestierten Unsicherheit sowohl im Neuwagen- als auch im Gebrauchtwagenmarkt von BEVs.

5 Ausblick

Um Lösungen für die sämtlichen Herausforderungen zu finden, befassen sich Forschung und Praxis intensiv mit alternativen Möglichkeiten zur Datenerfassung in Traktionsbatterien. So ziehen beispielsweise Forschende des Lehrstuhls PEM der RWTH Aachen auch die Möglichkeit integrierter Drucksensorik als Teillösung in Betracht. Die Überwachung und Dokumentation der Zellinnendruck-Entwicklung bietet eine alternative Möglichkeit zur In-situ-Bestimmung des Batterie-SoH. Die damit realisierte Echtzeitbewertung erweitert bestehende elektrische Charakterisierungsmethoden und eröffnet neue Spielräume zur Analyse und Optimierung der Batterienutzung. Dadurch lassen sich adaptive Anpassungen und gezielte Nutzungsempfehlungen ableiten, um die Degradation zu minimieren und die Batterielebensdauer zu verlängern. Dies ermöglicht nicht nur die Etablierung individueller Betriebsstrategien für Fahrzeughalter, sondern auch eine genauere Evaluation und Prognose der verbleibenden Batterieleistungsfähigkeit, die auf vergangenen Nutzungsdaten basiert. Die Resultate lassen sich dann für eine präzisere Restwertbestimmung der Batterie nutzen.

Die verbesserte Einschätzung des Batteriezustands durch das Erfassen des Druckniveaus kann somit zu einer transparenteren Informationsbasis und zur Unterstützung für die Entscheidungsfindung aller Marktteilnehmer beitragen. Dies kann das Vertrauen in den BEV-Markt stärken und fördert zugleich die nachhaltigere Nutzung von Energiespeichersystemen.

LITERATUR

- [1] König, A.; Nicoletti, L.; Schröder, D. et al.: An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal* 12 (2021) 1, S. 21
- [2] Suttakul, P.; Wongsapai, W.; Fongsamootr, T. et al.: Total cost of ownership of internal combustion engine and electric vehicles: A real-world comparison for the case of Thailand. *Energy Reports* 8 (2022), S. 545–553
- [3] Paarmann, S.; Schreiber, M.; Chahbaz, A. et al.: Short-Term Tests, Long-Term Predictions – Accelerating Ageing Characterisation of Lithium-Ion Batteries. *Batteries & Supercaps* 7 (2024) 11
- [4] Menye, J. S.; Camara, M.-B.; Dakyo, B.: Lithium Battery Degradation and Failure Mechanisms: A State-of-the-Art Review. *Energies* 18 (2025) 2, S. 342
- [5] Clerici, D.; Martelli, S.; Mocera, F. et al.: Mechanical characterization of lithium-ion batteries with different chemistries and formats. *Journal of Energy Storage* 84 (2024), S. 110899
- [6] Popp, H.; Koller, M.; Jahn, M. et al.: Mechanical methods for state determination of Lithium-Ion secondary batteries: A review. *Journal of Energy Storage* 32 (2020), S. 101859
- [7] Ponomareva, A.: Battery Management System (BMS): Effective Ways to Measure State-of-Charge and State-of-Health. *Medium* (2021)
- [8] Hu, X.; Feng, F.; Liu, K. et al.: State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114 (2019), S. 109334
- [9] S. V.; Che, H. S.; Selvaraj, J. et al.: State of Health (SoH) estimation methods for second life lithium-ion battery—Review and challenges. *Applied Energy* 369 (2024), S. 123542
- [10] Han, X.; Lu, L.; Zheng, Y. et al.: A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation* 1 (2019), S. 100005
- [11] Zhuo, M.; Offer, G.; Marinescu, M.: Degradation model of high-nickel positive electrodes: Effects of loss of active material and cyclable lithium on capacity fade. *Journal of Power Sources* 556 (2023), S. 232461
- [12] Birk, C. R.; Roberts, M. R.; McTurk, E. et al.: Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources* 341 (2017), S. 373–386
- [13] Lin, X.; Khosravinia, K.; Hu, X. et al.: Lithium Plating Mechanism, Detection, and Mitigation in Lithium-Ion Batteries. *Progress in Energy and Combustion Science* 87 (2021), S. 100953
- [14] Adenius, H.; Chass, G. A.; Passerini, S. et al.: Lithium Batteries and the Solid Electrolyte Interphase (SEI)—Progress and Outlook. *Advanced Energy Materials* 13 (2023) 10
- [15] Su, L.; Xu, Y.; Dong, Z.: State-of-health estimation of lithium-ion batteries: A comprehensive literature review from cell to pack levels. *Energy Conversion and Economics* 5 (2024) 4, S. 224–242
- [16] Gervillié-Mouravieff, C.; Bao, W.; Steingart, D. A. et al.: Non-destructive characterization techniques for battery performance and life-cycle assessment. *Nature Reviews Electrical Engineering* 1 (2024) 8, S. 547–558
- [17] Orcioni, S.; Buccolini, L.; Ricci, A. et al.: Lithium-ion Battery Electro-thermal Model, Parameter Estimation, and Simulation Environment. *Energies* 10 (2017) 3, S. 375
- [18] Pozzato, G.; Allam, A.; Pulvirenti, L. et al.: Analysis and key findings from real-world electric vehicle field data. *Joule* 7 (2023) 9, S. 2035–2053
- [19] Yuan, Q.; Hao, W.; Su, H. et al.: Investigation on Range Anxiety and Safety Buffer of Battery Electric Vehicle Drivers. *Journal of Advanced Transportation* 2018 (2018), S. 1–11
- [20] Zhao, J.; Feng, X.; Tran, M.-K. et al.: Battery safety: Fault diagnosis from laboratory to real world. *Journal of Power Sources* 598 (2024), S. 234111
- [21] Wang, S.; Ren, D.; Xu, C. et al.: Lithium plating induced volume expansion overshoot of lithium-ion batteries: Experimental analysis and modeling. *Journal of Power Sources* 593 (2024), S. 233946
- [22] Louli, A. J.; Ellis, L. D.; Dahn, J. R.: Operando Pressure Measurements Reveal Solid Electrolyte Interphase Growth to Rank Li-Ion Cell Performance. *Joule* 3 (2019) 3, S. 745–761
- [23] Proff, H.; Bowman, K.; Robinson, R. et al.: 2024 Global Automotive Consumer Study. Key Findings: Global Focus Countries (2024), S. 1–26
- [24] Deutsche Automobil Treuhand GmbH: DAT Report 025 | Kurzbericht. 2025
- [25] Sieg, J.; Schmid, A. U.; Rau, L. et al.: Fast-charging capability of lithium-ion cells: Influence of electrode aging and electrolyte consumption. *Applied Energy* 305 (2022), S. 117747
- [26] Aviloo GmbH: Erstmalige Messung der Batteriedegradation in Abhängigkeit zum Schnellladeanteil. 29.03.2023
- [27] Hackmann, M.; Knörzer, H.; Peuffer, J. et al.: Battery aging in practice: Analysis of over 7,000 vehicles provide deep insights into battery life and vehicle residual value (2024)

Maximilian Graaf, M.Sc. 
m.graaf@pem.rwth-aachen.de

Fabian Hohiesel, M.Sc. 
f.hohiesel@pem.rwth-aachen.de

Lehrstuhl für Production Engineering
of E-Mobility Components PEM
Battery Engineering & Safety
RWTH Aachen University
Bohr 12, 52072 Aachen
www.pem.rwth-aachen.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)