

Batteriealterung in der Praxis: Analyse von über 7.000 Fahrzeugen gibt tiefe Einblicke in Batterielebensdauer und Fahrzeug-Restwert

Ergebnisse der Analyse zeigen deutlich geringere Alterung als angenommen und geben eine positive Perspektive für die weitere Nutzung der Batterien.

Autoren: Markus Hackmann, Heiko Knörzer, Jannik Pfeuffer, Paul Jeckel

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Motivation

1. Presseartikel und Social-Media-Beiträge prägen die öffentliche Wahrnehmung. _____ 02
2. Faktenbasierte Aufklärung als Schlüssel zum Erfolg der Elektromobilität. _____ 03
3. Die Langlebigkeit von Batterien wird durch ihre Restkapazität definiert. _____ 04

Grundlagen und Begriffsdefinitionen

4. Restkapazität verstehen - die Bedeutung von Brutto- und Nettokapazität. _____ 05
5. Kapazitätsabweichung in der Praxis. _____ 06
6. Unabhängige Restkapazitätstests zur Bewertung des SoH. _____ 07
7. Felddaten zeigen eine deutlich langsamere Alterung als bisher angenommen. _____ 08

Ergebnisse und Interpretation

8. Unterschiedliches Nutzungsverhalten führt zur Streuung der Felddaten. _____ 10
9. Schonendes Lade- und Fahrverhalten kann die Batterielebensdauer stark erhöhen. _____ 11
 - I. Einflussfaktor kalendarische Alterung _____ 11
 - II. Einflussfaktor zyklische Alterung _____ 12
10. Sehr gute Garantieleistungen für Batteriesysteme bestätigen Vertrauen in deren Haltbarkeit. _____ 13
11. Die lange Lebensdauer ermöglicht eine zweite Nutzung der Batterie. _____ 14
12. Die Batterie hat auch nach der Nutzung im Elektroauto einen hohen Restwert. _____ 15

Zusammenfassung und Kontakt

13. Zusammenfassung _____ 17
14. Abkürzungsverzeichnis _____ 18
15. Abbildungsverzeichnis _____ 19
16. Kontakt _____ 20

1. Presseartikel und Social-Media-Beiträge prägen die Wahrnehmung eines hohen Restwertverlustes von Elektroautos durch die Alterung der Batterie.

In den letzten Monaten wurde in zahlreichen Zeitungsartikeln und Social-Media Beiträgen Bedenken über die schnelle Alterung von Batterien in Elektrofahrzeugen geäußert. Gebrauchte Elektrofahrzeuge (EVs) werden als „wie Blei in den Regalen liegend“ beschrieben, da die schnelle Alterung der Batterie zu einer deutlichen Verringerung der Reichweite führe. Diese reduzierte Reichweite schränke den Nutzen des Fahrzeugs erheblich ein und lasse viele Verbraucher glauben, dass gebrauchte Elektrofahrzeuge unbrauchbar seien.

Sowohl die kritische Berichterstattung als auch die allgemein rückläufige Nachfrage von EVs führen dazu, dass potenzielle Käufer sich zunehmend Fragen zum Risiko eines wirtschaftlichen Totalschadens von Elektrofahrzeugen stellen. Da die Batterie einen erheblichen Kostenanteil von 20% bis 30%¹⁾ an Elektrofahrzeugen ausmacht, beeinflusst eine gealterte Batterie den Restwert des Fahrzeugs stark. Verbraucher möchten wissen, ob Batterien in EVs im Regelfall vorzeitig ersetzt werden müssen und welche finanziellen Folgen dies für sie hätte.

Die vorliegende Studie geht deshalb der Frage nach, wie beständig die Kapazitäten von Batterien in Elektrofahrzeugen tatsächlich sind und in welchem Maße Bedenken bezüglich vorzeitiger Alterung gerechtfertigt sind.

„E-Autos mit mega Verlust - diese Stromer sind jetzt Schnäppchen“

-Focus Online-

„Restwert von E-Autos: Die aktuelle E-Auto-Generation folgt der Logik eines wirtschaftlichem Totalschadens“

-MSN-

„Nachfrage gleich Null: Gebrauchte E-Autos verkaufen sich nicht“

-Tagesschau.de-

„Warum der Akkuzustand beim E-Auto oft für Rätsel sorgt“

-Tagesschau.de-

1) Der exakte Anteil der Batteriekosten am Gesamtpreis eines Elektrofahrzeugs kann stark variieren, abhängig von Faktoren wie Fahrzeugtyp, Fahrzeugklasse, Zellchemie und Batteriekapazität.

2. Faktenbasierte Aufklärung als Schlüssel zum Erfolg der Elektromobilität.

Elektromobilität spielt eine entscheidende Rolle im Kampf gegen den Klimawandel, indem sie maßgeblich zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beiträgt. Dennoch bringt dieser Wandel einige Herausforderungen mit sich. Neben den hohen Produktionskosten stellt auch das Verständnis der spezifischen Vor- und Nachteile dieser neuen Technologie gegenüber etablierten Antrieben eine wesentliche Herausforderung dar. Deshalb ist es wichtig, Verbraucher umfassend aufzuklären, um Missverständnisse rund um die Elektromobilität und insbesondere über die Batterielebensdauer zu beseitigen. Fehlinformationen können den Übergang zur Elektromobilität negativ beeinflussen, indem sie unbegründete Ängste verstärken und so die gesellschaftliche Akzeptanz und Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen verringern. Dafür ist die Bereitstellung verlässlicher und transparenter Daten entscheidend, um ein realistisches Bild der tatsächlichen Batterielebensdauer zu vermitteln und damit das Vertrauen in Elektrofahrzeuge zu stärken. Diese Studie soll dazu beitragen, Missverständnisse aus dem Weg zu räumen und fundierte Kaufentscheidungen für Verbraucher faktenbasiert zu ermöglichen.

Zusammenfassung der Ergebnisse: Hohe Langlebigkeit von Elektrofahrzeug-Batterien - auch bei intensiver Nutzung.

Die Analyse zeigt, dass Elektrofahrzeug-Batterien auch bei hohen Laufleistungen von über 200.000 Kilometern eine bemerkenswerte Lebensdauer aufweisen. Die meisten Batterien behalten langfristig mehr als 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität und bleiben damit weit über den üblichen Garantiezeitraum hinaus zuverlässig einsetzbar. Technologische Fortschritte, wie verbesserte Zellchemien und optimierte Batteriemanagementsysteme, tragen zusätzlich zu leistungsfähigeren Batterien mit langer Lebensdauer bei.

Obwohl Faktoren wie Fahrzeugtyp und Nutzungsverhalten die Alterung der Batterie beeinflussen können, bleibt selbst bei stark beanspruchten Fahrzeugen ihr wirtschaftlicher Wert erhalten. Nach dem Einsatz im Fahrzeug kann sie zum Beispiel in einem stationären Speicher weitergenutzt werden. Zudem können durch das Batterierecycling wertvolle Rohstoffe wie Lithium und Nickel zurückgewonnen werden, was langfristig einen beständigen Wert sicherstellt.

3. Die Langlebigkeit von Batterien wird durch ihre Restkapazität definiert.

Eine Batterie verliert mit der Zeit und durch die Nutzung an Kapazität und Effizienz. Dieser Kapazitätsverlust wird als kalendarische Alterung (Zeit) bzw. zyklische Alterung (Nutzung) bezeichnet.

Beim kalendarischen Altern einer Batterie ändern sich chemische Strukturen in den Batteriezellen, auch ohne aktive Nutzung. Durch zyklisches Altern entstehen zusätzlich Belastungen durch das Laden und Entladen der Batterie. Es verschlechtert somit den Gesundheitszustand, was sowohl die Speicherefähigkeit von Energie als auch die Leistungsfähigkeit negativ beeinflusst.

Erläuterung des "State of Health" (SoH)

Der Gesundheitszustand bzw. "State of Health" (SoH) ist eine Kennzahl, die das Maß der Alterung einer Batterie widerspiegelt. Im neuen, optimalen Zustand liegt der SoH einer Batterie bei 100%. Derzeit existiert in der Industrie und Wissenschaft keine allgemein anerkannte oder einheitliche Definition für den State of Health. Dies liegt daran, dass verschiedene Hersteller und Branchen unterschiedliche Ziele verfolgen und entsprechende Berechnungsmethoden verwenden. Einige Fahrzeughersteller maximieren beispielsweise die anfängliche Reichweite ihrer Elektrofahrzeuge, akzeptieren jedoch eine spätere Reduzierung durch Batteriealterung (geringer Puffer, siehe folgende Seite). Andere setzen auf einen großen Puffer, der die anfängliche Reichweite einschränkt, aber die Alterung ausgleicht und langfristig eine konstante Reichweite bietet. Diese Strategien können selbst innerhalb der Modellpalette eines Herstellers variieren. Einheitliche Standards und Normen fehlen deshalb bei der Definition von SoH bislang.

In der vorliegenden Studie wird eine einfache Definition des SoH verwendet, der sich ausschließlich auf die Kapazität bezieht. Weitere Faktoren wie der Innenwiderstand oder die Lade- und Entladehistorie werden nicht berücksichtigt.

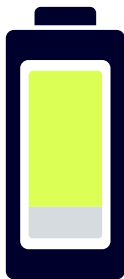
Damit ergibt sich folgende Formel für die Berechnung des SoH:

$$\text{SoH} = \frac{\text{Kapazität}_{\text{Aktuell}}}{\text{Kapazität}_{\text{Neuzustand}}}$$

4. Restkapazität verstehen - die Bedeutung von Brutto- und Nettokapazität.

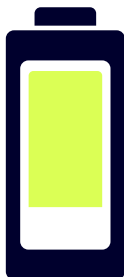
Bei der Bestimmung des SoH ist es wichtig, klar zwischen den Begriffen Brutto- und Nettokapazität zu unterscheiden. Ein einheitliches Verständnis beugt Missverständnisse vor und stellt sicher, dass Angaben unterschiedlicher Hersteller und Testanbieter vergleichbar sind. Damit werden eine eindeutige Bewertung des Batteriezustands sowie verlässliche Einblicke in die nutzbare Energie im Alltag ermöglicht.

Bruttokapazität

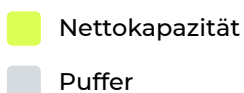


- Die Bruttokapazität beschreibt die installierte Energiemenge einer Batterie.
- Ein Teil dieser Kapazität ist als „Puffer“ ausgelegt, um die Batterie vor Überlastung und Tiefenentladung zu schützen.
- Manche Fahrzeughersteller nutzen Pufferkapazitäten, um Alterungseffekte auszugleichen.
- Der Puffer ist für den Nutzer nicht zugänglich und kann somit nicht zur Reichweitenbestimmung herangezogen werden.
- Für die Bestimmung des SoH ist die Bruttokapazität weniger relevant, da sie die gesamte, jedoch nicht vollständig für den Verbraucher nutzbare Kapazität der EV-Batterie definiert.

Nettokapazität



- Die Nettokapazität gibt den nutzbaren Anteil der Batterie an. Dieser beschreibt die Energiemenge, die unter idealen Bedingungen für den Nutzer verfügbar ist.
- Der Puffer ist bei der Nettokapazität nicht inkludiert.
- Die Nettokapazität einer Batterie im Neuzustand entspricht einem SoH von 100%.



5. Kapazitätsabweichungen in der Praxis.

Im alltäglichen Gebrauch können Unterschiede in der verfügbaren Kapazität und der damit verbundenen Reichweite unabhängig von Alterungseffekten der Fahrzeuge festgestellt werden. Äußere Faktoren wie Temperatur sowie Fahr- und Ladeverhalten beeinflussen die nutzbare Energiemenge der Batterie. Bei idealen Temperaturen von 20 bis 25°C arbeitet die Batterie elektrochemisch effizienter. Dieser thermodynamische Effekt ist im Alltag jedoch meist nur durch Messverfahren nachweisbar und für den Fahrer kaum spürbar. Es ist wichtig zu betonen, dass hierbei nicht der in der Öffentlichkeit oft diskutierte Effekt der Reichweitenreduzierung durch erhöhten Energieverbrauch für das Heizen gemeint ist. In diesem Fall steht die Energie zwar zur Verfügung, wird aber für das Aufwärmen des Fahrzeugs genutzt und somit "verheizt", was für den Fahrer als geringere Reichweite deutlich spürbar ist.

Des Weiteren können Kapazitätsabweichungen durch die Notreserve beeinflusst werden. Diese stellt den Unterschied zwischen der angezeigten Restkapazität und der tatsächlich vorhandenen Nettokapazität dar. Wenn das Fahrzeug 0% Ladezustand anzeigt, ist noch ein kleiner Teil der Nettokapazität vorhanden. Diese Reserve ermöglicht es beispielsweise, eine kurze Strecke bis zur nächsten Ladestation zurückzulegen. Wie groß diese Notreserve ausfällt, variiert je nach Strategie der Fahrzeughersteller, wodurch recht unterschiedliche Reichweiten bei niedrigen Ladezuständen resultieren können.



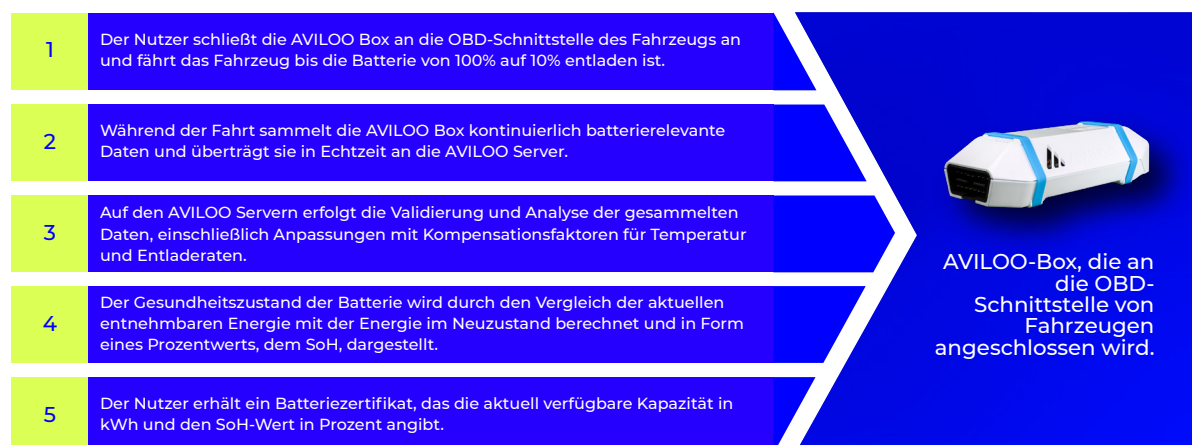
6. Unabhängige Restkapazitätstests zur Bewertung des SoH.

Das Ziel dieser Studie ist es, die Frage zu beantworten: „Wie stark ist die Alterung von Batterien in der Praxis?“. Dafür werden in der Studie zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zunächst wurden 50 Fahrzeuge aus der P3-Elektrofahrzeugflotte auf ihre bisherige Alterung untersucht und in den Zusammenhang mit dem Nutzungs- und Ladeverhalten der Fahrzeughalter gebracht. Diese Auswahl hatte zum Ziel, Einblicke in möglichst verschiedene Fahr- und Ladeprofile zu erlangen, sowie Unterschiede zwischen den Herstellern zu erfassen.

Aviloo, ein führendes Unternehmen im Bereich der Batteriediagnostik, hat bereits über 60.000 Kapazitätstests durchgeführt. Für den zweiten Schritt dieser Studie, lieferten sie Datenpunkte von über 7.000 Fahrzeugen mit bis zu 300.000 km Fahrleistung, die auf Basis ihres präzisen Premium-Test erhoben wurden (Abb. 1). Dadurch konnte die Batteriealterung in Bezug auf die Laufleistung detailliert und quantitativ bewertet werden. Durch die Bereitstellung der Datenpunkte konnte die Datenbasis der P3-Flotte gezielt erweitert werden, wodurch eine fundiertere Analyse ermöglicht wurde.

Bisherige Abschätzungen der Batteriealterung, wie beispielsweise durch das P3-SoH-Modell, basieren vorwiegend auf akademischen Daten und Labormessungen.²⁾ Dabei werden meist einzelne Batteriezellen betrachtet, statt eines ganzen Batteriepacks oder Fahrzeugen. In dieser Studie basieren die Daten jedoch auf realen Fahrzeugdaten aus dem Feld und sind damit allen in der Praxis auftretenden Einflüssen ausgesetzt. Außerdem bilden die Daten verschiedene Batteriemanagementsysteme und die damit einhergehenden Alterungsstrategien der Fahrzeughersteller ab. Dadurch bietet die Studie eine fundierte Grundlage, um die realen Alterungsprozesse von Elektrofahrzeug-Batterien zu verstehen.

So läuft ein SoH Test mit Aviloo ab:



2) Das P3-SoH-Modell zur Alterungsabschätzung basiert auf Literaturwerten und modelliert eine zweistufige lineare Alterung. Studien, die zur Bewertung der Batteriealterung herangezogen wurden sind u.A.: Impact of Dynamic Driving Loads and Regenerative Braking on the Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, Journal of The Electrochemical Society, 164(A3081); Ali, H., Beltran, H., Lindsey, N. J., & Pecht, M. (2020). Assessment of the Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries for Long-Term Space Missions. Timilsina, L. et al. (2022). Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study. Clemson University; Keil, P., & Jossen, A. (2017).

7. Felddaten zeigen eine deutlich langsamere Alterung als bisher angenommen.

Die Untersuchung zeigt, dass die Kapazitätsdegradation der Batterie in den ersten 30.000 Kilometern beschleunigt verläuft, sich danach stabilisiert und annähernd linear fortsetzt. Der beobachtete Alterungsverlauf bestätigt, dass die Degradation im späteren Verlauf der Nutzung deutlich geringer ausfällt als in der Anfangsphase.

Dies liegt unter anderem daran, dass sich auf der Anode in den ersten Lade- und Entladezyklen eine sogenannte SEI-Schicht (Solid Electrolyte Interphase) bildet. Bei der Bildung dieser Schicht wird Lithium "verbraucht" bzw. in Abbauprodukte umgewandelt, wodurch weniger Lithium für die Energiespeicherung zur Verfügung steht. Dies führt zu einem stärkeren anfänglichen Kapazitätsverlust. Nachdem sich die SEI-Schicht stabilisiert hat, verlangsamt sich dieser Kapazitätsverlust deutlich.

Während die Daten eine erhebliche Streuung aufweisen, ist dennoch ein klarer Trend erkennbar: Der Großteil der Messwerte liegt, selbst nach über 200.000 km, oberhalb von 80% SoH. Die durch Regression ermittelte Trendlinie zeigt, dass der SoH auch bei hohen Laufleistungen von 200.000 bis 300.000 Kilometern stabil bleibt und die getesteten Batterien eine überraschend gute Langlebigkeit aufweisen.

Die P3-Flottendaten basieren auf intensiv genutzten Fahrzeugen im Alter von 3 bis 5 Jahren und liefern zusätzlich wertvolle Einblicke in reale Nutzungsbedingungen und den Kapazitätsverlust. Diese Datenpunkte zeigen, dass der SoH der P3-Fahrzeuge weitgehend mit den Daten von Aviloo übereinstimmt und im Vergleich zu theoretischen Modellen eine bedeutend bessere Lebensdauer zeigt.



Fast alle getesteten P3-Fahrzeuge weisen einen SoH von über 90% auf. Dies deutet darauf hin, dass die Batterien der P3-Flotte, trotz unterschiedlicher Hersteller, unterschiedlicher Nutzungsprofile und intensivem Gebrauch, weiterhin eine sehr gute Leistungsfähigkeit beibehalten.

Bisherige Alterungsmodelle, wie zum Beispiel das P3-Alterungsmodell, basieren hauptsächlich auf Alterungsmessungen von Batteriezellen im Labor. Es zeigt sich, dass dort die Degradation deutlich pessimistischer eingeschätzt wurde. Die Felddaten legen jedoch nahe, dass die tatsächliche Kapazität unter realen Bedingungen, vor allem bei hohen Laufleistungen der Fahrzeuge, länger erhalten bleibt.

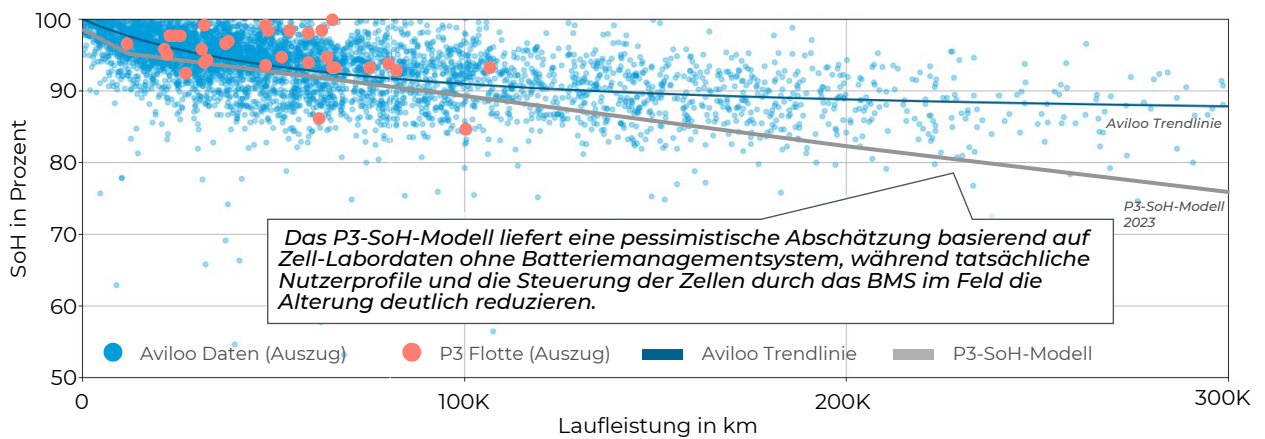


Abb. 1: SoH vs Fahrleistung für EVs mit Batterien >30 kWh.

8. Unterschiedliches Nutzungsverhalten führt zur Streuung der Felddaten.

Bei der Auswertung der Daten lässt sich eine deutliche Streuung der SoH-Werte für vergleichbare Reichweiten feststellen. Diese Variabilität ist darauf zurückzuführen, dass der SoH von diversen Faktoren wie dem Lade- und Nutzungsverhalten beeinflusst wird (siehe folgende Seite). Außerdem legen Automobilhersteller unterschiedlich großen Wert auf die Minimierung der Batteriedegradation, was zu ebenso unterschiedlichen Strategien im Umgang mit der Alterung führt. Der von den Herstellern vorgesehene Puffer kann beispielsweise genutzt werden, um die für den Fahrer wahrnehmbare Alterung innerhalb des Garantiezeitraums deutlich zu senken. Manche Fahrzeughersteller nutzen Softwareupdates, um die Ladeperformance anzupassen und damit die Alterung zu beeinflussen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist außerdem zu beachten, dass die Datenlage für Fahrzeuge mit über 200.000 km Kilometerstand deutlich schlechter ist als für Fahrzeuge mit geringerer Laufleistung. Bisher existieren nur wenige Fahrzeuge mit entsprechend großen zurückgelegten Strecken auf dem Markt. Dadurch wird die Aussagekraft für hohe Kilometerstände etwas eingeschränkt und führt zusätzlich zu einer größeren Streuung der Daten.

Darüber hinaus muss der „Survivorship Bias“ berücksichtigt werden. Dieser beschreibt die Verzerrung, die entsteht, wenn nur erfolgreiche bzw. „überlebende“ Einheiten in einer Beobachtung betrachtet werden. In der vorliegenden Studie bedeutet das, dass nur Fahrzeuge betrachtet werden, die bei der getesteten Laufleistung noch fahrtauglich waren. Fahrzeuge, die aufgrund von Batterieausfällen nicht mehr im Einsatz sind, werden nicht einbezogen. Das kann die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge tendenziell zu positiv erscheinen lassen. Allerdings sind Ausfälle von Elektrofahrzeugen insgesamt selten. Wenn Ausfälle auftreten, ist dies nur vereinzelt auf die Antriebs-Batterie zurückzuführen.³⁾ Einzelfälle, wie beispielsweise durch spezielles Nutzungsverhalten oder Produktionsfehler bedingte Ausfälle, können dennoch vorkommen. Sie treten oft innerhalb der Garantiezeit auf und stellen somit selten ein finanzielles Risiko für Verbraucher dar.

Ein umfassendes Bild erfordert den Einsatz großer Datenmengen, um verlässliche Aussagen zu treffen. Die vorliegende Datenerhebung erfüllt diese Anforderung und liefert ein durchweg positives Ergebnis zur langfristigen Zuverlässigkeit von Elektrofahrzeug-Batterien.

Die beobachtete Streuung innerhalb der Ergebnisse ist unter anderem auf individuelle Nutzungsgewohnheiten zurückzuführen. Während selbst bei stark beanspruchten Batterien ein langfristiger Erhalt der Kapazität zu beobachten ist, können bestimmte Verhaltensweisen helfen, die Batterie darüber hinaus zu schonen. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Einflussfaktoren des Nutzungsverhaltens auf die Batteriealterung im Überblick.

³⁾ ADAC Pannens Statistik 2023

9. Schonendes Lade- und Fahrverhalten kann die Batterielebensdauer stark erhöhen.

I. Einflussfaktor kalendarische Alterung (Zeit, „Nicht-Nutzung“⁴⁾)

	Positiver Einfluss ⁵⁾	Negativer Einfluss ⁵⁾
Temperatur Eine zu hohe Temperatur ist Triebkraft für chemische Reaktionen, die zur beschleunigten Degradation der Kapazität führt. Es wird empfohlen, das Fahrzeug bei mittleren bis niedrigen Temperaturen abzustellen.	 Niedrige bis mittlere Temperaturen (< 25 °C)	 Hohe Temperaturen (>60 °C)
Ladezustand (State of Charge, SoC) Der Ladezustand beeinflusst die chemischen Prozesse in der Batterie ebenfalls – hohe Spannungen ⁶⁾ beschleunigen die Alterung der Batterie, speziell bei längerem Stillstand. Es wird empfohlen, das Fahrzeug bei sehr langen Standzeiten mit einem niedrigen⁷⁾ (~10%) bis mittleren Ladezustand (~50%) abzustellen.	 Niedriger bis mittlerer SoC (10 - 50%)	 Hoher SoC (> 80%)

4) Die „Nicht-Nutzung“ bezieht sich auf den Zustand eines parkenden Fahrzeugs, ohne geladen zu werden; 5) Grundsätzlich kann das angezeigte Verhalten als positiv oder negativ betrachtet werden. Unterschiedliche Zellchemien und auch der SoC dürfen für Detailanalysen nicht unberücksichtigt bleiben; 6) Die Quantifizierung von „hoch“ ist abhängig von der Zellchemie; 7) Das Auto sollte nicht bei 0% SoC abgestellt werden, um Tiefenentladung vorzubeugen;

II. Einflussfaktor zyklische Alterung (Nutzung⁸⁾)

	Positiver Einfluss	Negativer Einfluss
Temperatur Sowohl zu hohe als auch zu niedrige Temperaturen können Alterungsmechanismen während der Nutzung verstärken (erhöhte SEI Bildung, Li-Plating, Zerfall chem. Struktur). Am besten ist es, wenn beim Zyklieren (Laden und Entladen) die Temperatur im mittleren Bereich 20-50 °C liegt.	 Mittlere Temperaturen	 Hohe und niedrige Temperaturen
Ladegeschwindigkeit Häufiges Schnellladen (bei hohen C-Raten, >3-4 C), belastet die chemischen Strukturen durch hohe Temperaturen, Ströme und Spannungen. Häufiges Schnellladen lässt die Batterie altern, während gelegentliches Schnellladen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Alterung hat.	 Seltenes Schnellladen	 Häufiges Schnellladen
Ladeverhalten Das Fahrzeug regelmäßig vollständig leer zu fahren und wieder auf 100% vollzuladen (hohe Entladungstiefe / DoD ⁹⁾) führt zu höheren Belastungen innerhalb der Batterien und damit verstärkter Alterung. Ein regelmäßiges Zyklieren bei einem kleinen DoD, bspw. zwischen 20% und 80% ist vorteilhaft. Gelegentliche hohe DoD für Langstrecken, haben keine nennenswerten Auswirkungen auf die Alterung.	 Kleiner DoD und ØSoC	 Hoher DoD und ØSoC
Fahrverhalten Durch starkes Beschleunigen und lange Fahrten mit hohen Geschwindigkeiten fließen hohe Ströme, wodurch die Temperatur steigt und die Batterie stärker belastet wird. Moderates Fahrverhalten verlangsamt die Batteriealterung.	 Konstante, niedrige Geschwindigkeiten	 Hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigen

⁸⁾ Die Nutzung bezieht sich auf das Fahren oder Laden des Fahrzeugs; ⁹⁾ Depth-of-Discharge, was den Bereich der Entladung angibt und kann beispielsweise 0% bis 100% oder auch nur 40% bis 60% des Ladezustandes darstellen, zwischen dem zyklisiert wird.

10. Sehr gute Garantieleistungen für Batteriesysteme bestätigen das Vertrauen in die Langlebigkeit.

Die Fahrzeughersteller haben in den letzten Jahren aufgrund wachsender Erfahrung und kontinuierlichem technischen Fortschritt das Know-how und Vertrauen in ihre Batteriesysteme gestärkt und sprechen zunehmend hohe Garantien für diese aus. Das Garantieverprechen sichert eine Restkapazität von mindestens 70% bis zu einem bestimmten Alter oder einer bestimmten Laufleistung zu, je nachdem was zuerst erreicht wird. Sollte diese Kapazität unterschritten werden, umfasst die Garantie Reparaturmaßnahmen wie den Austausch des gesamten Batteriepacks oder einzelner Module (auch unter Verwendung aufbereiteter Komponenten), um die garantierte Kapazität wieder herzustellen.

Standardmäßig beträgt die Garantie für EV-Batteriesysteme derzeit acht Jahre oder 160.000 Kilometer. Im Vergleich dazu erhalten Verbraucher für das Gesamtfahrzeug und die übrigen Komponenten lediglich eine Garantie von rund vier Jahren und 80.000 Kilometern. In den letzten Jahren wurden Batteriesysteme durch optimierte Zelldesigns, verbesserte chemische Zusammensetzungen sowie Fortschritte im Thermomanagement und in der Software erheblich verbessert. Diese Entwicklungen zielen unter anderem darauf ab, die Batterien vor ungünstigen Bedingungen wie extremen Temperaturen oder übermäßigen Stromflüssen zu schützen.

Hersteller bieten zunehmend umfangreichere Garantiebedingungen

Die in dieser Studie dargestellten Daten zeigen, dass die 70% SoH in der Praxis selten innerhalb des Garantiezeitraums unterschritten werden. Darüber hinaus haben erste Hersteller ihre Garantien auf zehn Jahre oder deutlich über 200.000 Kilometer hinaus verlängert. Lexus bietet als Vorreiter in Sachen Batteriegarantien beispielsweise für das Modell UX 300e eine Garantieverlängerung auf zehn Jahre oder eine Million Kilometer an. Diese verbesserten Garantiebedingungen spiegeln das zunehmende Vertrauen der Hersteller in die Langlebigkeit ihrer Batteriesysteme wider.

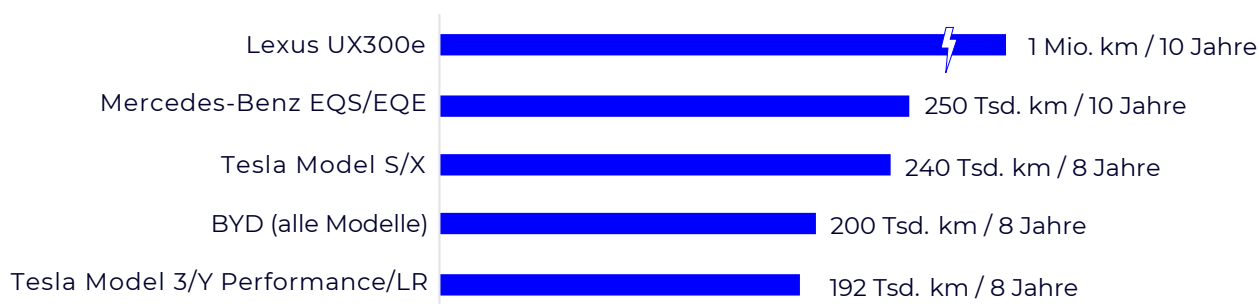


Abb. 2: Garantielaufzeiten für EV-Batteriesysteme.

11. Die lange Lebensdauer ermöglicht eine zweite Nutzung der Batterie.

Der Lebenszyklus einer Batterie kann in mehrere Phasen unterteilt werden: End-of-Warranty (EoW), End-of-First-Life (EoFL) und End-of-Second-Life (EoSL). Das EoW markiert den Zeitpunkt, an dem die Herstellergarantie aufgrund der Kilometerleistung oder der seit dem Kauf verstrichenen Zeit endet. Nach diesem Zeitpunkt wird vom Hersteller kein Mindest-SoH mehr garantiert. Die durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass die Batterie auch über die Garantiezeit hinaus mit ausreichend Kapazität im Fahrzeug genutzt werden kann. Selbst das EoFL tritt erwartungsgemäß noch ein, bevor die Batterie 70% SoH erreicht hat. Beispielsweise kann anhand folgender Kriterien das EoFL definiert werden:

- Das Fahrzeug ist nicht mehr fahrtauglich, wobei die Ursache dafür nicht die Batterie ist.
- Die Batterie ist unabhängig von ihrer Kapazität aufgrund von Defekten (z.B. an den Busbars oder Steuergeräten) beeinträchtigt, kann jedoch weiterhin durch Wiederaufbereitung oder der Entnahme einzelner Module genutzt werden.
- Die verbleibende Kapazität und damit die Reichweite ist für die Fahrer nicht mehr ausreichend, um den Ansprüchen an ein Elektrofahrzeug gerecht zu werden.

Am EoFL wird die Batterie aus dem Fahrzeug ausgebaut und analysiert. Je nach Zustand, kann sie weiterhin in einer Second-Life Anwendung genutzt werden¹⁰⁾. Im Falle einer Eignung, wird sie umgewidmet, indem Komponenten ausgetauscht und erneuert werden und findet dann beispielsweise in Stationärspeichern ein zweites Leben. Das EoSL wird erreicht, wenn die Batterie aufgrund von zu stark abgenommener Kapazität oder Sicherheitsrisiken für keine weitere Anwendung mehr geeignet ist und recycelt werden muss.

Exemplarischer Verlauf des SoH während der Lebensphasen einer Batterie

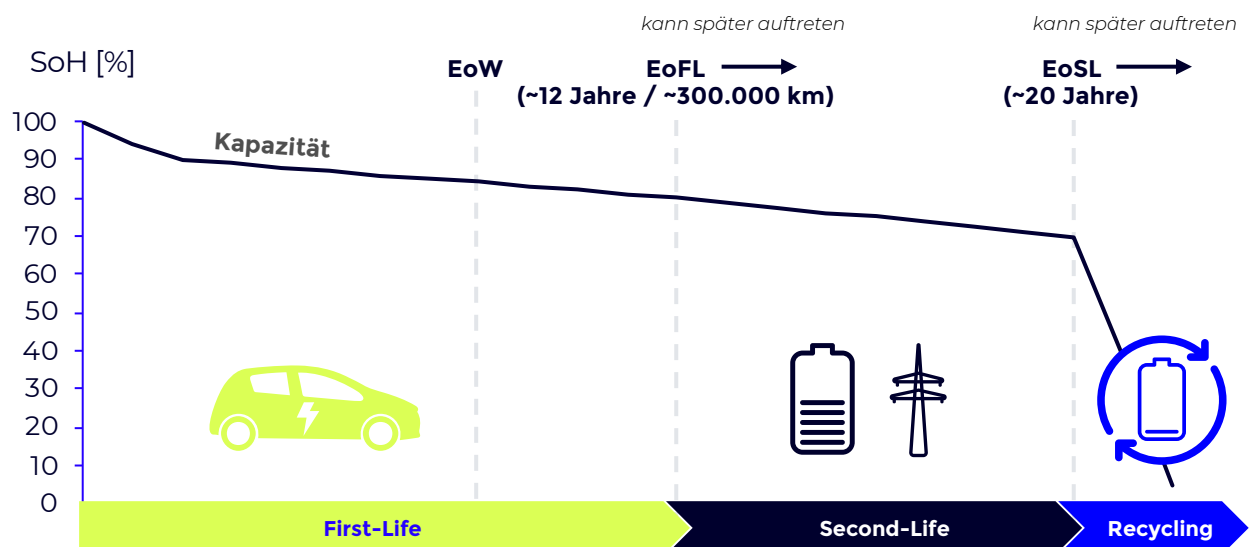


Abb. 3: SoH vs Fahrleistung für EVs mit Batterien >30 kWh.

¹⁰⁾ Welche Bedingungen eine Batterie erfüllen müssen, um für eine Second-Life Anwendung geeignet zu sein, kann im Themenpapier „Wertstoffkreislauf von Traktionsbatterien aus Europa: Potenziale von Second Life Anwendungen“ des Clusters Elektromobilität Süd-West c/o e-mobil BW GmbH nachgelesen werden.

12. Die Batterie hat auch nach der Nutzung im Elektroauto einen hohen Restwert.

Der Restwert von Elektrofahrzeugen bezieht sich auf den geschätzten Wert eines Fahrzeugs nach einer bestimmten Nutzungsdauer. Während der Batterie-Restwert maßgeblich von aktuellen Marktpreisen für E-Fahrzeuge und den Preisen für neue Batterien bestimmt wird, spielt auch der Zustand der gebrauchten Batterie eine zentrale Rolle. In jeder Lebenszyklusphase ist mit einem Restwertverlust zu rechnen. Dieser hängt ebenfalls von unterschiedlichen Faktoren ab. In der Praxis wird nach dem Erreichen des EoFL die Batterie getestet, um festzustellen, ob sie sich noch für eine Second-Life-Anwendung eignet. Selbst eine stark gealterte Batterie bedeutet nach dem First- oder Second-Life noch keinen wirtschaftlichen Totalschaden, da wertvolle Rohstoffe wie Lithium, Nickel und Kupfer weiterhin erhalten sind. Durch das Recycling von Batterien können diese Metalle und weitere Materialien zurückgewonnen und für die Produktion von neuen Batterien genutzt werden und haben damit weiterhin einen ökonomischen Nutzen. Eine exemplarische Analyse des Restwerts einer Lithium-Ionen-Batterie zeigt, dass sie 20 - 30 % des Wertes eines neuen Elektrofahrzeugs ausmacht. Innerhalb der Garantiezeit ist der Wertverlust stark von der Alterung und der verbleibenden Kapazität abhängig¹¹⁾. Nach Ablauf der Garantie ist ein stärkerer Wertverlust zu erwarten. Am Ende der ersten Lebenszeit kann die Batterie, abhängig von den Kosten neuer Batterien, durch eine zweite Nutzung dennoch einen signifikanten Restwert besitzen. Die Entscheidung über eine weitere Nutzung trifft das Unternehmen, das am EoFL im Besitz der Batterie ist und diese auf Eignung testet.

Exemplarischer Verlauf des Restwertes während der Lebensphasen einer Batterie¹²⁾

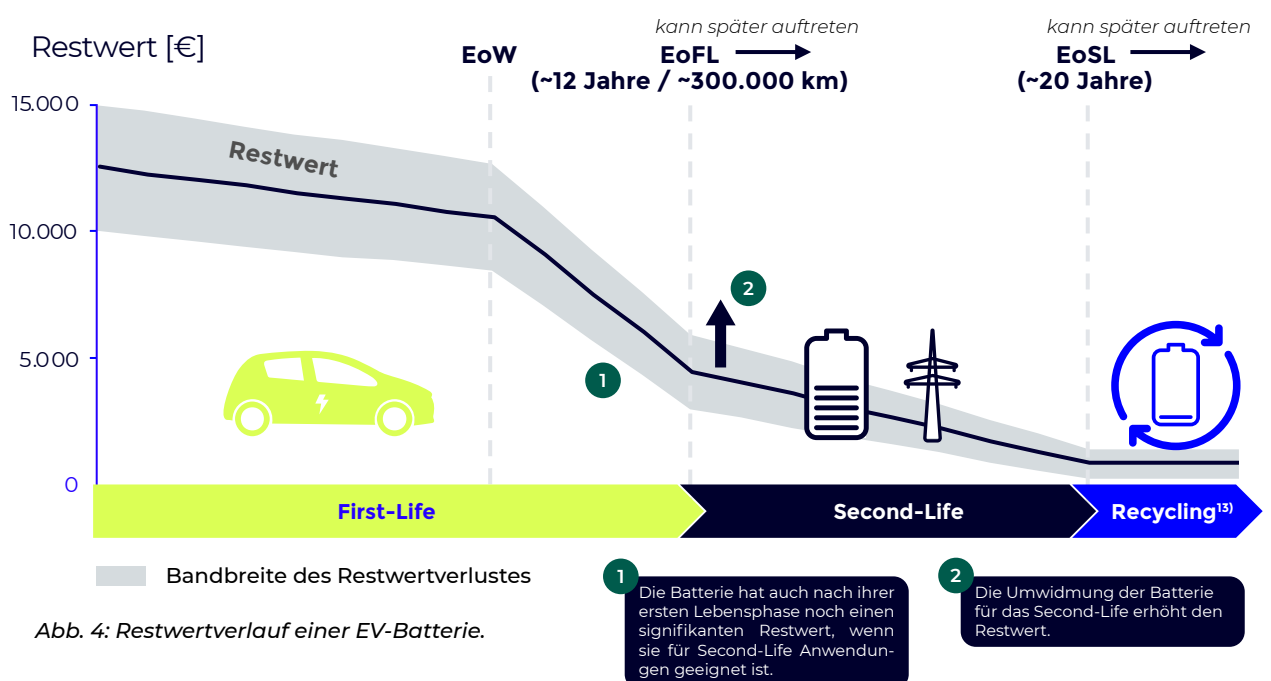


Abb. 4: Restwertverlauf einer EV-Batterie.

11) Reine Betrachtung des Verfalls der Kapazität. Eine marktwirtschaftliche Wertermittlung unter Berücksichtigung niedriger aktueller Preise für Neubatterien lässt je nach Marktlage den Wert stärker fallen. 12) Vereinfachte Darstellung mit exemplarischem Verlauf des Restwertes einer EV-Batterie mit 75 – 100 kWh von einem deutschen Premium-Fahrzeughersteller. 13) Der Wert der Batterie nach der zweiten Lebensdauer basiert auf sogenannten Metallpayables und den enthaltenen Metallen zu Marktpreisen, die typischerweise ein Recycler bereit ist, für die Batterie zu zahlen.

Durch Wiederaufbereitung lässt sich der Wert der gebrauchten Batterie steigern, bis sie schließlich, unabhängig vom Gesundheitszustand, einen Mindestwert erreicht, den ein Recyclingunternehmen dafür bezahlt. Diese Zahlungsbereitschaft hängt von der Menge der enthaltenen Metalle, den aktuellen Marktpreisen, Rückgewinnungsquoten und Prozesskosten ab.



13. Zusammenfassung

Die Studie zeigt, dass Elektrofahrzeug-Batterien selbst bei intensiver Nutzung eine hohe Langlebigkeit aufweisen. Sogar bei Laufleistungen von über 200.000 Kilometern behalten die meisten Batterien mehr als 80% ihrer ursprünglichen Kapazität und sind damit weit über den üblichen Garantiezeitraum hinaus einsatzfähig. Technologische Fortschritte in Zellchemie und Batteriemanagementsystemen erhöhen zusätzlich die Leistungsfähigkeit und Beständigkeit der Batterien.



Batterien von Elektrofahrzeugen verfügen über eine lange Lebensdauer.

Felddaten zeigen, dass Batterien von Elektrofahrzeugen langfristig nur geringfügig an Kapazität verlieren und selbst bei Laufleistungen von über 200.000 Kilometern weiterhin leistungsfähig sind.



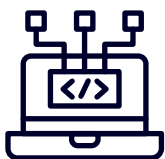
Unabhängige SoH-Messungen schaffen größeres Vertrauen.

Standardisierte und zuverlässige SoH-Messverfahren sind wichtige Werkzeuge, um den Gesundheitszustand von gebrauchten Elektrofahrzeug-Batterien zu beurteilen und für Second-Life-Anwendungen zu bewerten.



Batterielebensdauer kann vom Nutzer optimiert werden.

Durch batterieschonendes Nutzungsverhalten (z.B. durch Parken bei mittlerem SoC, Laden mit niedrigen Strömen und moderatem Fahrverhalten) kann die Langlebigkeit der Batterie weiter verbessert werden.



Technologischer Fortschritt als Schlüssel zu verbesserter Langlebigkeit.

Technologischer Fortschritt hat sowohl die Leistungsfähigkeit als auch Langlebigkeit von Elektrofahrzeug-Batterien deutlich erhöht. Verbesserte Zellchemien, Thermomanagement und Batteriesoftware schützen die Batterie besser vor frühzeitiger Alterung, was Herstellern erlaubt Garantien von bis zu zehn Jahren oder über 200.000 Kilometer.



Eine Batterie kann mehrere Leben haben.

Selbst nach dem Ende ihrer Lebensdauer im Fahrzeug bleiben die Batterien nutzbar. Wird ein Batteriesystem oder Komponenten aus einem Elektrofahrzeug ausgebaut, gibt es zahlreiche Optionen für die Wiederverwendung, wodurch ein signifikanter Restwert erhalten bleibt.

Abkürzungsverzeichnis

DoD = Depth of discharge / Entladetiefe
EoFL = End of first life / Erstes Lebensende
EoSL = End of second life / Zweites Lebensende
EoW = End of warranty / Ende der Garantiezeit
EV = Electric Vehicle / Elektrofahrzeug
OBD = Onboard-Diagnose
SoC = State of Charge / Ladezustand
SoH = State of Health / Gesundheitszustand

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: SoH vs Fahrleistung für EVs mit Batterien >30 kWh.	8
Abb. 2: Garantielaufzeiten für EV-Batteriesysteme.	11
Abb. 3: Lebenszyklusphasen einer EV-Batterie.	12
Abb. 4: Restwertverlauf einer EV-Batterie.	13

ERREICHEN SIE IHRE ZIELE MIT UNS AN IHRER SEITE!



Markus Hackmann

Managing Director

+49 163 7533612

Markus.Hackmann@p3-group.com



Heiko Knörzer

Technology Consultant

Heiko.Knoerzer@p3-group.com



Jannik Pfeuffer

Senior Consultant

Jannik.Pfeuffer@p3-group.com



Paul Jeckel

Technology Consultant

Paul.Jeckel@p3-group.com

Adresse

P3 group GmbH

Heilbronner Straße 86

70191 Stuttgart

Germany

Jetzt Kontakt aufnehmen!

+49 711 252 749-0

mail@p3-group.com

www.p3-group.com