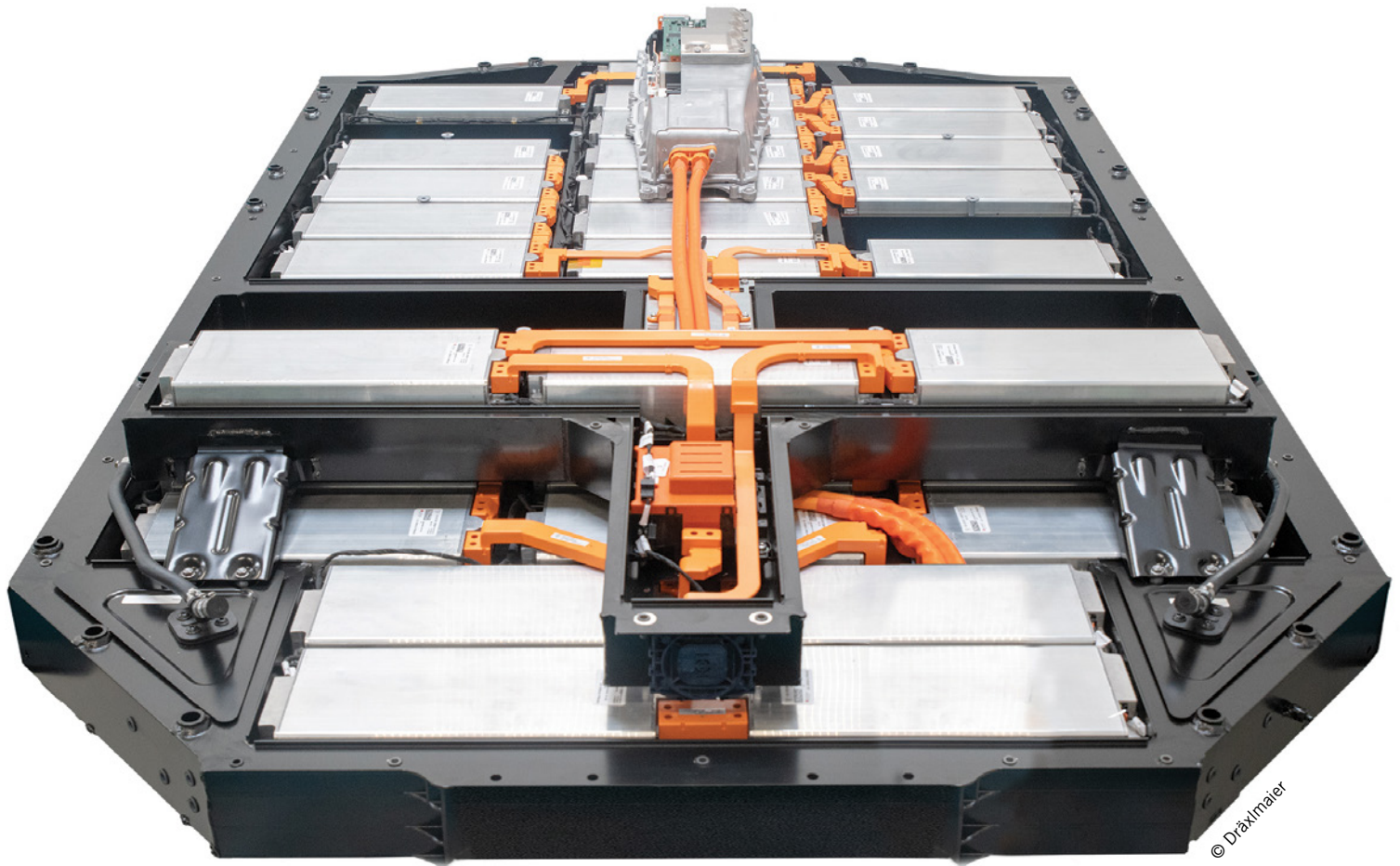


ATZ extra



Lithium-Ionen-Batterien

Reichweitenbestimmung



© Dräxlmaier

Reichweitenbestimmung von Lithium-Ionen-Batterien

Vollelektrisch oder durch ein Hybridsystem angetriebene Fahrzeuge sollen eine hohe Leistung, gleichzeitig aber auch eine große Reichweite bieten. Sowohl die richtige Zellauswahl als auch die passenden Algorithmen im Batteriemanagementsystem sind entscheidend, um diese gegensätzlichen Eigenschaften erfüllen und berechnen zu können. Dräxlmaier hat ein Berechnungsmodell entwickelt, das die nutzbare Batteriekapazität bei hochdynamischen Fahrprofilen konkret beschreibt.

Die Reichweite eines vollelektrischen Fahrzeugs wird durch die Batteriekapazität und den Energiebedarf pro Kilometer definiert. Bei der Entwicklung des Fahrzeugkonzepts stehen daher die

Wahl der richtigen Batteriezelle und die Definition der Schlüsselkriterien an erster Stelle der Prioritäten. Einen Überblick der wichtigsten elektrischen Eigenschaften der Batteriezellen gibt das

sogenannte Ragone-Diagramm. Bei üblicherweise fest vorgegebenem Bau- raum für die Hochvolt(HV)-Batterie ist dabei die volumetrische Energiedichte in Relation zur Leistungsdichte dar-



Dr. rer. nat. Dirk Lehmkuhl
ist Experte im Bereich Battery Cells
and Concept Development bei der
DRÄXLMAIER Group
in Vilsbiburg.



Simon Meier, M. Sc.
ist Experte für Battery Simulation
and Artificial Intelligence bei der
DRÄXLMAIER Group in Garching
bei München.

gestellt. **BILD 1** zeigt dieses Diagramm für zwei Energiezellen (a und b) und zwei Leistungszellen (c und d). Bei der Energiezelle a steht für den Leistungsbedarf mit beispielsweise 2 W/cm^3 deutlich mehr Energie als bei der Leistungszelle c zur Verfügung. Dafür kann letztere deutlich höhere Leistungen als die Energiezelle a liefern.

DIE STROMABHÄNGIGE KAPAZITÄT

Die Kapazität eines Akkumulators, also einer wiederaufladbaren Zelle, hängt unter anderem von den Einflussgrößen Temperatur und Stromstärke ab. Diese können zu einer Änderung der Nennkapazität der Zelle führen. Eine Kapazitätsänderung kann sowohl umkehrbar als auch unumkehrbar sein. Wird eine Zelle etwa für eine längere Zeit einer höheren Umgebungstemperatur ausgesetzt, führt dies unweigerlich zu einem permanenten, unumkehrbaren (irreversiblen) Kapazitätsverlust (Alterung). Wird die Zelle hingegen nur für einen einzigen Entladezyklus einer tiefen Umgebungstemperatur ausgesetzt, so ergibt die Messung eine niedrigere Kapazität als bei Raumtemperatur. Dieser Verlust ist jedoch lediglich der genannten Messbedingung geschuldet. Der Kapazitätsverlust ist also reversibel.

Besonders komplex stellt sich der Zusammenhang der Stromstärke zum Kapazitätsverhalten dar. Für eine genauere Betrachtung dieser Einflussgröße dient das sogenannte Peukert-Gesetz [1]. Die phänomenologische Gl. 1 beschreibt näherungsweise die Kapazität (Peukert-Kapazität C_p) von Zellen in Abhängigkeit vom Entladestrom I_{cell} :

$$\text{Gl. 1} \quad C_p(I_{\text{cell}}) = C_N \left(\frac{I_N}{I_{\text{cell}}} \right)^{k-1}$$

Hierbei ist k die sogenannte Peukert-Zahl, die bei Lithium-Ionen-Zellen ungefähr bei 1,05 liegt. Bei Energiezellen wird laut Norm für den Nennstrom I_N immer der Wert für die Nennkapazität $\frac{1}{3} C_N$ in der Einheit [A] verwendet. Falls $I_{\text{cell}} = I_N$, dann ist $C_p = C_N$. Der auf das Gesetz zurückgehende Peukert-Effekt besagt: Je höher der Entladestrom, desto weniger Kapazität kann der Zelle entnommen

werden. Die Peukert-Gleichung gilt nur für bestimmte Entladeströme, bei kleiner werdenden Entladeströmen steigt die Istkapazität beliebig an. Auch ist der Entladestrom laut Gesetz anders als in Realität nicht begrenzt. Die Erfahrungen zeigen, dass der Gültigkeitsbereich für $C_p \approx C_{\text{IST}}$ ungefähr bei $I_N < I_{\text{cell}} < 3 I_N$ liegt. Mittels der Gleichung lässt sich mit $C_{\text{IST}} = I_{\text{cell}} t$ und der Zellspannung U_{cell} ein zeitabhängiger Widerstand (Polarisationswiderstand) berechnen, bei dem man den genannten Gültigkeitsbereich berücksichtigen muss.

HERAUSFORDERUNGEN BEI HÖHEREN LEISTUNGEN UND STRÖMEN

Neben der Energiedichte, **BILD 1**, ist auch die Kapazität einer Zelle bei höheren Stromstärken interessant. Um diesen Zusammenhang zu ermitteln, wurde die Kapazität der Zelle a in **BILD 1** bei verschiedenen Entladeströmen bestimmt. Die C-Rate stellt ein Maß für die Beanspruchung der Zelle dar und setzt den Entladestrom einer Lithium-Ionen-Zelle in Bezug zu ihrer maximalen Kapazität. Das C in C-Rate steht hierbei für Kapazität. Der reversible Kapazitätsverlust bei höherer C-Rate (Kapazitätsbeschränkung) ist deutlich zu erkennen.

Insbesondere im Premiumsegment von vollelektrischen Serienfahrzeugen stellt der Kunde hohe Anforderungen in Bezug auf Leistung und kurze Ladezeiten. Dies führt zum Trend, die Belastung der Batterie stetig zu steigern. Hin zu hohen C-Raten unterliegt die Batterie immer höheren Strömen und damit einhergehend einem sukzessive zunehmenden Einfluss der Kapazitätsbeschränkung, **BILD 2**.

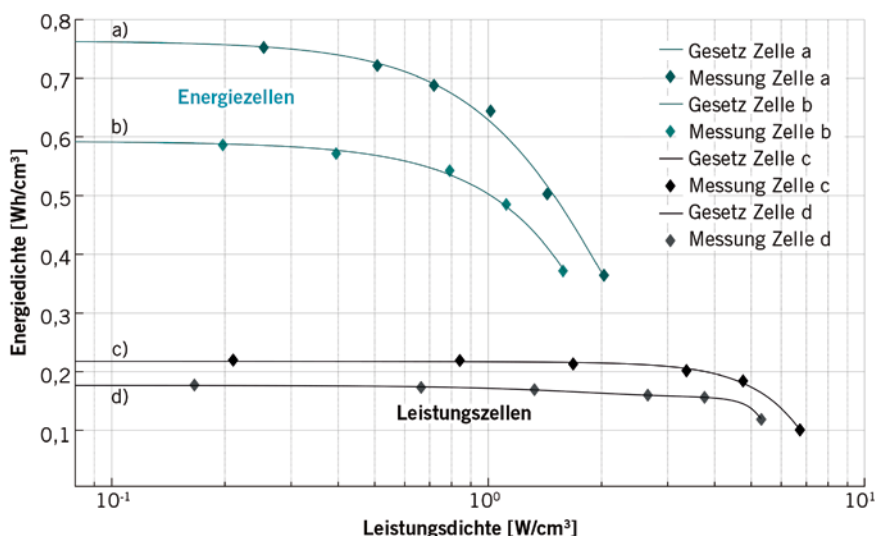


BILD 1 Volumetrisches Leistungs- und Energiedichtediagramm zweier Energie- und Leistungszellen (© Dräxlmaier)

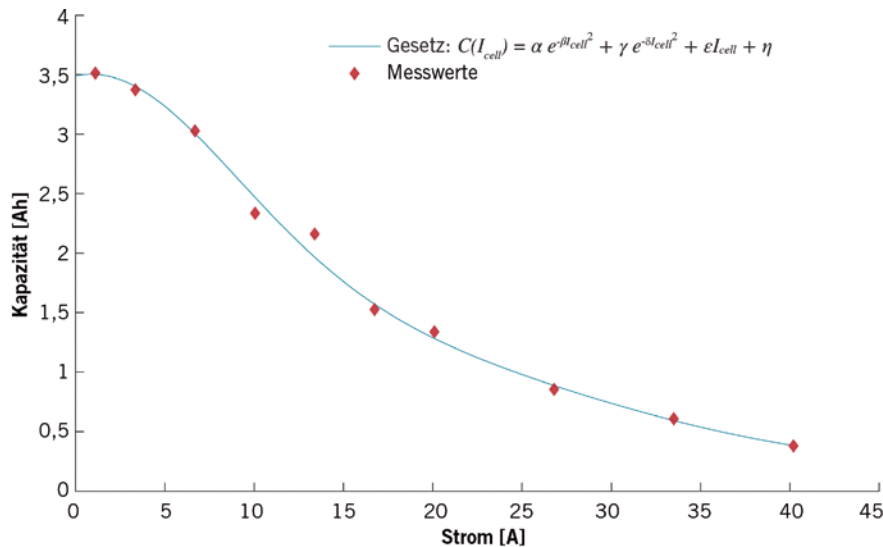


BILD 2 Stromabhängigkeit der Istkapazität in einem erweiterten Gültigkeitsbereich – verallgemeinerte Peukert-Gleichung (© Dräxlmaier)

Bei der Betrachtung des aktuellen Premiumsegments kann eine Einteilung für die gängigen Belastungsbereiche von Fahrzeugen erstellt werden, die eine Leistung über 400 kW aufweisen. Daraus ergibt sich eine Einordnung in drei Zonen, **BILD 3**:

- Bereich 1: kontinuierliche Leistung für konstante Geschwindigkeit/Energieverbrauch, Reichweite des Fahrzeugs

($I_N < I_{cell} < 4,5 I_N$)

- Bereich 2: Schnellladeleistung der HV-Batterie, Reichweite des Fahrzeugs ($6 I_N < I_{cell} < 9 \frac{2}{3} I_N$)
- Bereich 3: Spitzenleistungen der HV-Batterie/Beschleunigung, Leistungsanhebung (Boost) ($15 I_N < I_{cell} < 24 I_N$).

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen,

dass aktuelle Fahrzeuge meist für besondere Spitzenbelastungen (Bereich 3) mit Pulsbeanspruchungen von über 5C ausgelegt sind. In dieser Leistungsklasse spielt die stromabhängige Kapazitätseinschränkung eine wichtige Rolle bei der Funktionsentwicklung von Batteriemanagementsystemen.

Kontinuierlichere Belastungen treten beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und beim Schnellladen auf. Die maximale Ladeleistung ist eine für viele Kunden entscheidende Größe beim Kauf. Eine exakte Vorhersage der Ladezeit ist hier ein wichtiges Kriterium, um sich von anderen Marktteilnehmern abzuheben. Für eine genaue Reichweitenvorhersage sollten ebenfalls die Verbräuche beziehungsweise C-Raten bei konstanten Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Diese wurden für den Bereich 1 aus **BILD 3** simulativ für die zugrunde liegenden Fahrzeuge ermittelt. Hier werden vor allem die Belastungen berücksichtigt, die in Zyklen wie dem Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) nicht abgedeckt werden, jedoch für Hochleistungsfahrzeuge einer realistischen Nutzung entsprechen. In allen drei Bereichen wirken kapazitätseinschränkende Ströme, die über den Definitionsbereich

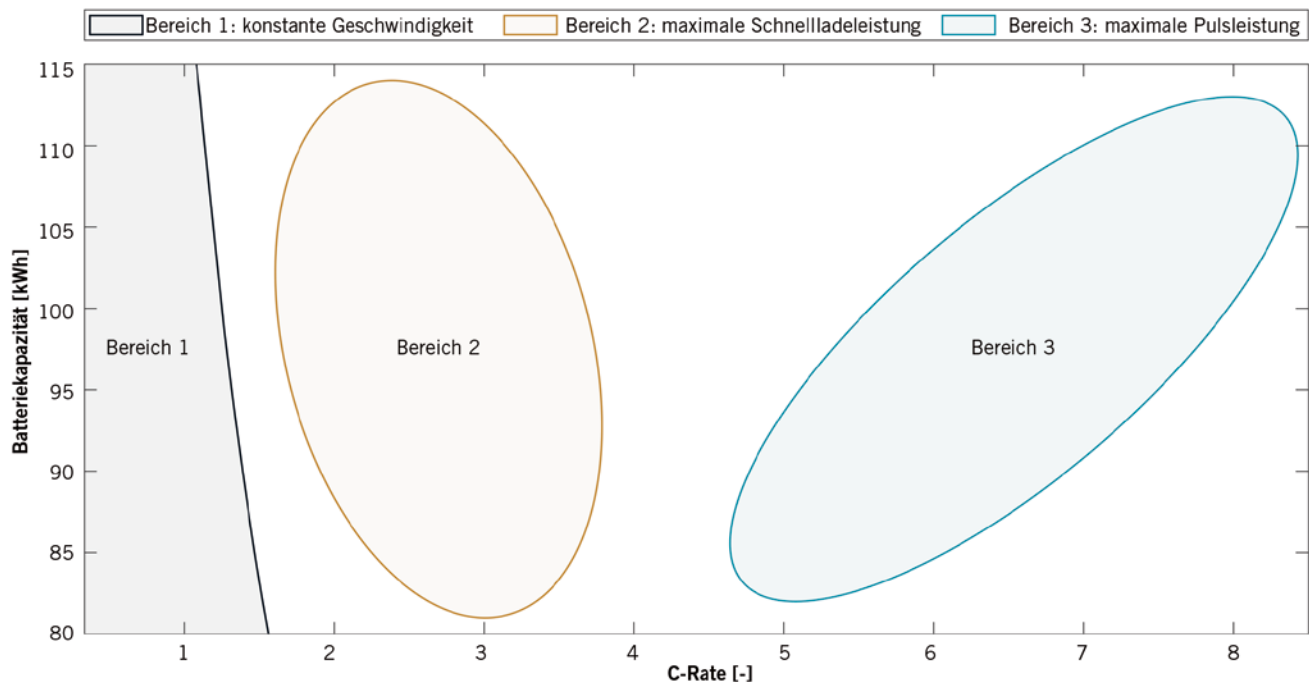


BILD 3 C-Raten bei Fahrzeugen mit Leistungen über 400 kW mit Unterteilung in die Bereiche konstantes Fahren, Schnellladen und Spitzenleistung (© Dräxlmaier)

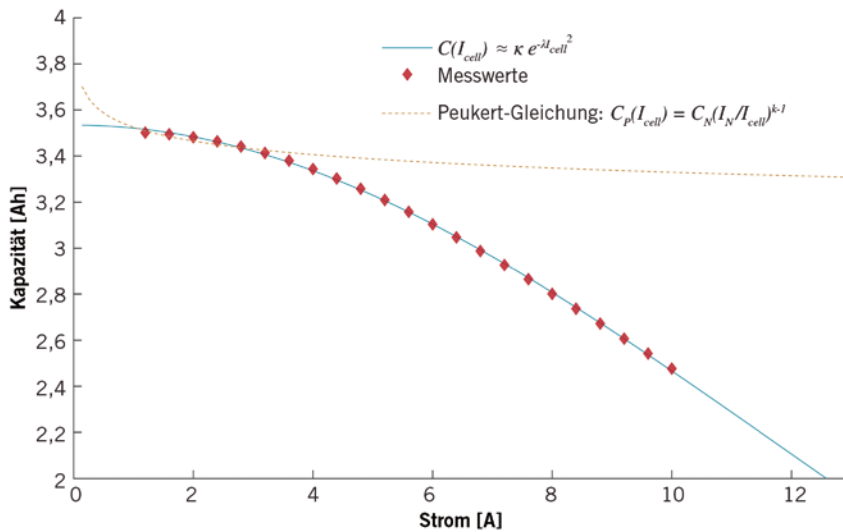


BILD 4 Ausschnitt aus **BILD 2** mit Peukert-Gesetz und einer Näherungsformel für die verallgemeinerte Peukert-Gleichung (© Dräxlmaier)

des Peukert-Gesetzes hinausgehen und über ein erweitertes Peukert-Gesetz beschrieben werden müssen.

Die stromabhängige Kapazität für sehr hohe Entladeströme und eine konstante Zelltemperatur nach **BILD 2** wird in Gl. 2 beschrieben:

$$\text{Gl. 2} \quad C(I_{\text{cell}}) = \alpha e^{-\beta I_{\text{cell}}^2} + \gamma e^{-\delta I_{\text{cell}}^2} + \varepsilon I_{\text{cell}} + \eta$$

Für die Daten in **BILD 2** wurden isotherme Messungen bei einer Zelltemperatur von 25 °C durchgeführt. Da insbesondere bei hohen Strömen die Messungen nicht vollständig isotherm ablaufen, ergeben sich Fehler bei der Bestimmung der Parameter α , β , γ , δ , ε , η . Zusätzlich ist von Messungenauigkeiten (Strom, Spannung, Zeit) auszugehen. Insgesamt ergibt sich für die Messung ein quadratischer Mittelwertfehler (Root Mean Square Error, RMSE) von 0,03.

Der Batteriestrom wird im Feld in der Regel anisotherm gemessen. Für eine Reichweitenbestimmung sind daher die Parameter im Labor in Abhängigkeit von der Zelltemperatur zu bestimmen.

Gl. 2 beschreibt die allgemeine stromabhängige Kapazität und stellt eine Verallgemeinerung der Peukert-Gleichung (Gl. 1) dar. Um dies mathematisch zu zeigen, muss die Peukert-Gleichung in einer Taylor-Reihe nach dem gültigen

Entladestrom $I_N < I_{\text{cell}} < 3I_N$ entwickelt und mit der entsprechenden Taylor-Reihe der Funktion $C(I_{\text{cell}})$ verglichen werden. Grafisch ist dies in **BILD 4** mittels eines Ausschnitts der gesamten Messung aus **BILD 2** dargestellt. Die beste Übereinstimmung mit Gl. 1 ergibt für die Peukert-Zahl den Wert $k = 1,025$.

Eine Anwendung des erweiterten Peukert-Gesetzes $C(I_{\text{cell}})$ (Gl. 2) ist die Analyse des Ragone-Diagramms, **BILD 1**. Die stromabhängige Kapazität lässt sich nur näherungsweise in die leistungsabhängige Energie umrechnen, weil für das Ragone-Diagramm die Zelle mit einer konstanten Leistung entladen wird.

Bei allen untersuchten Energiezellen wurden für die Parameter $\beta = \delta$ nahezu identische Werte gefunden. Des Weiteren ließ sich bei den Ragone-Diagrammen für die Energiezellen kein nennenswerter Beitrag am linearen Anteil feststellen, das heißt es können näherungsweise die Parameter $\varepsilon = \eta \approx 0$ gesetzt werden.

Für kleine C-Raten ($6 I_N < I_{\text{cell}} < 9 I_N$) kann die Istkapazität näherungsweise durch Gl. 3 beschrieben werden:

$$\text{Gl. 3} \quad C(I_{\text{cell}}) \approx \kappa e^{-\lambda I_{\text{cell}}^2}$$

Auch bei der Ragone-Darstellung für Energiezellen lässt sich die Energiedichte als Funktion der Leistungsdichte mit den

genannten Vereinfachungen als Exponentialfunktion beschreiben, schließlich wird auch der Einsatz der Energiezellen für Anwendungen mit kleinen C-Raten empfohlen. Die Gl. 3 kann durch Transformationen in Gl. 4 überführt werden:

$$\begin{aligned} \text{Gl. 4} \quad C(I_{\text{cell}}) &= t I_{\text{cell}} \text{ und} \\ t I_{\text{cell}} &= \kappa e^{-\lambda I_{\text{cell}}^2} \\ \text{Anwenden des Logarithmus} \\ \text{auf beiden Seiten führt zu:} \\ \log(t) &= -\lambda I_{\text{cell}}^2 - \log(I_{\text{cell}}) + \log(\kappa) \end{aligned}$$

Die zwei unbekannten Parameter κ , λ können dann mit den bekannten Verfahren der kleinsten Quadrate zur Ausgleichsberechnung (Least Square Fitting) online bestimmt werden. Zu beachten ist, dass nach Gl. 2 $\alpha \neq \kappa$, $\beta \neq \lambda$ ist.

Die vereinfachte, verallgemeinerte Peukert-Gleichung (Gl. 3) ermöglicht somit gegenüber dem traditionellen Peukert-Gesetz die Berechnung der Istkapazität $C(I_{\text{cell}})$ in einem größeren Gültigkeitsbereich mit den temperatur-, toleranz- und alterungsabhängigen Parametern κ , λ . Des Weiteren kann mit $C(I_N) = C_N$ eine alterungsabhängige Nennkapazität berechnet werden, aus der sich der Alterungszustand (State of Health, SOH) ergibt.

Die Gl. 3 kann mithilfe der Lambertschen Funktion nach dem Strom aufgelöst und weiter in eine Gleichung für einen zeitabhängigen Widerstand (Polarisationswiderstand) überführt werden. Wenn zudem die Software den Einsatz von rechenintensiveren, numerischen Methoden zulässt, wäre auch alternativ die vollständige Invertierung der Gl. 2 möglich, um aus einer Grenzstrommessung neben dem Polarisationswiderstand zusätzlich die Kapazität zu berechnen, oder umgekehrt. Dieser Zusammenhang wird phänomenologisch bei der Batteriezustandserkennung für Starterbatterien bereits eingesetzt, um aus dem Kaltstart die Kapazität der Batterie zu bestimmen.

SIMULATION VON REICHWEITE UND LADEZUSTAND

In **BILD 5** sind sowohl die C-Raten einer einzelnen Zelle als auch die resultierende Spannung dargestellt. Der zugrunde liegende Fahrzyklus ist aus einer Geschwindigkeitsfahrt auf der Nordschleife des

Nürburgrings abgeleitet (Nürburgring-Zyklus). Eine negative C-Rate bedeutet, dass die Batterie durch Rekuperation während der Fahrt geladen wird.

In **BILD 6** zeigt die türkise Kurve den Verlauf des Ladezustands (State of Charge, SOC), wenn die Nennkapazität der Batterie zugrunde gelegt wird. Wird dieses Ergebnis mit dem Spannungsverlauf in **BILD 5** verglichen, dann ist unklar, ob die Leistung des HV-Batteriesystems letztlich für den Nürburgring-Fahrzyklus ausreicht. Der SOC (türkise Kurve) bezogen auf die Istkapazität nach Gl. 2 hingegen liefert das richtige Ergebnis.

AUSBLICK

Der Trend bei Elektrofahrzeugen im Premiumbereich mit Markteinführung in den kommenden Jahren geht weiterhin zu höheren Kapazitäten sowie Spitzenleistungen, um den steigenden Ansprüchen in Bezug auf Reichweite und Fahrdynamik Rechnung zu tragen. Das hier vorgestellte erweiterte Peukert-Gesetz kann in diesem Bereich mit sehr hohen Stromraten verbesserte Aussagen über den Batteriezustand und die Reichweite des Fahrzeugs liefern.

LITERATURHINWEIS

[1] Peukert, W.: Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakkumulatoren. In: ETZ Elektrotechnische Zeitschrift 18 (1897), S. 287-288

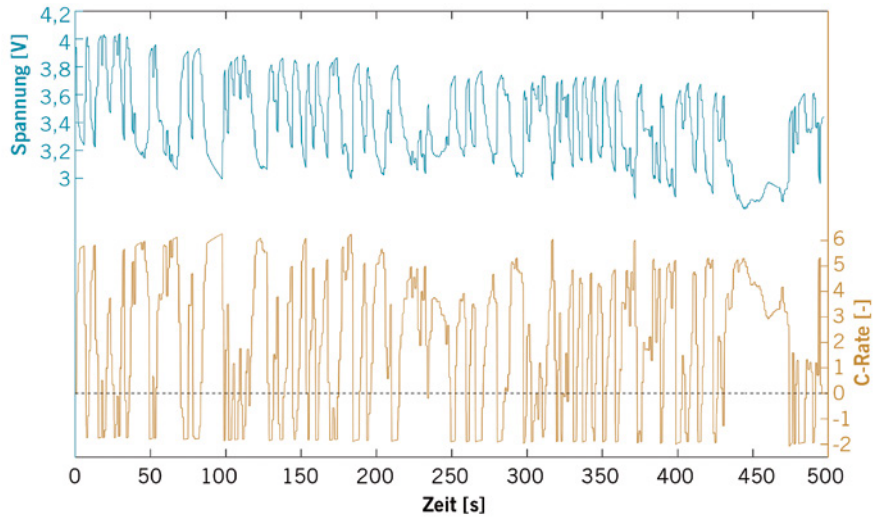


BILD 5 C-Rate und resultierende Spannung (skaliert auf die Zelle) für den Nürburgring-Fahrzyklus (© Dräxlmaier)

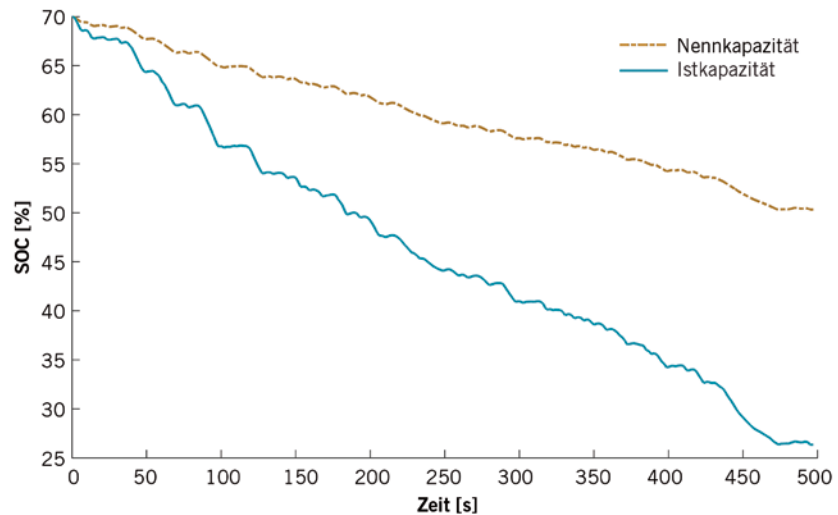


BILD 6 Zeitlicher Verlauf des Ladezustands für den Nürburgring-Fahrzyklus (der Ladezustand ist auf die Nennkapazität (braune Kurve) und die Istkapazität (türkise Kurve) bezogen) (© Dräxlmaier)

FOLGEN SIE DRÄXLMAIER:
www.draexlmaier.com



IMPRESSUM:

Sonderausgabe 2022 in Kooperation mit Fritz Dräxlmaier GmbH & Co. KG,
Landshuter Straße 100, 84137 Vilsbiburg;
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden,
Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE811484199

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabusch

TITELBILD: © zentilia | stock.adobe.com