

Speichervermögen von Lithium-Ionen-Batterien in Abhängigkeit vom Entladestrom

Bastian Spenger
Technische Hochschule Ingolstadt
Elektrotechnik und Elektromobilität
Fachsemester 4

Zusammenfassung—Dieses wissenschaftliche Paper gibt einen Überblick über den grundlegenden Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie. Zudem wird der Zusammenhang zwischen Speichervermögen und Entladestrom aufgezeigt. Zuletzt werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Lithium-Ionen-Batterie dargelegt.

Index Terms—Energiespeicher, Batterien, Lithium-Ionen-Batterien, Speichervermögen, Peukert

I. EINLEITUNG

Die Geschichte der Lithium-Ionen-Batterie hat 1962 ihren Anfang genommen. Es handelte sich zunächst um eine Batterie, die nach einmaliger Entladung nicht mehr aufgeladen werden konnte. Solche Batterien gehören zur Kategorie der Primärbatterien. Das Material der negativen Elektrode war Lithium und das der positiven Elektrode Mangandioxid. Diese Batterie wurde 1972 durch das Unternehmen Sanyo auf den Markt gebracht. Die Firma Moli Energy entwickelte 1985 die erste wiederaufladbare Batterie. Batterien, welche man nach einmaligem Entladen wieder aufladen kann, werden Sekundärbatterien genannt. Jene Batterie mit Lithium an der negativen Elektrode und Molybdänsulfid an der positiven Elektrode hatte aufgrund des Lithiums Sicherheitsprobleme. Der nächste Schritt in Richtung Lithium-Ionen-Batterien gelang durch die Nutzung von Materialien auf beiden Seiten der Elektroden, die eine Ein- und Auslagerung von Lithium ermöglichten und ein großes Spannungspotenzial besaßen. Das Unternehmen Sony entwickelte die erste wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterie und brachte diese 1991 auf den Markt. Das Aktivmaterial der negativen Elektrode war Kohlenstoff, das der positiven Elektrode war Lithium-Cobaltdioxid. Danach wurden die Lithium-Ionen-Batterien insbesondere in Ländern wie Südkorea und Japan weiterentwickelt

und fanden Eingang in viele Anwendungen [1]. Die Lithium-Ionen-Batterien finden heute Anwendung in den verschiedensten Bereichen wie beispielsweise der Elektromobilität und ist sehr weit verbreitet. Aufgrund der steigenden Anforderungen an z. B. Energiespeicher stellen Lithium-Ionen-Batterien ein spannendes Forschungsgebiet dar.

II. LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

A. Aufbau

Eine Batterie besteht aus einer Anode und einer Kathode. Um Kurzschlüsse zwischen den Elektroden zu vermeiden, werden Anode und Kathode durch einen Separator getrennt. Beim Laden fließen Elektronen von der Kathode zur Anode. Nach außen ist die Batteriezelle mit einem Plastikmantel umschlossen und mit einem Elektrolyt gefüllt. In der Substanz können die positiv geladenen Lithium-Ionen der Kathode schwimmen. Diese Ionen werden von der negativen Anode angezogen und gelangen durch die kleinen Öffnungen der porösen Trennschicht. Dort lagern sie sich in die Graphitschicht der Anode ein. Das Graphit kann somit zusätzliche Elektronen aufnehmen bis der Akku voll ist. Um den Verbraucher mit Strom versorgen zu können, wird in der Batterie chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Hierbei gibt die Anode Elektronen ab welche zum Verbraucher fließen. In der Batterie fließt somit Strom. Bis zur vollständigen Entladung der Batterie schwimmen die Lithium-Ionen zurück zur Kathode. In der Abbildung 1 ist der Entladevorgang einer Lithium-Ionen-Batterie zu sehen.

B. Kenngrößen einer Batterie

Eine Batterie hat sehr viele Parameter. Je nach Einsatzgebiet ist der richtige Batterietyp für die

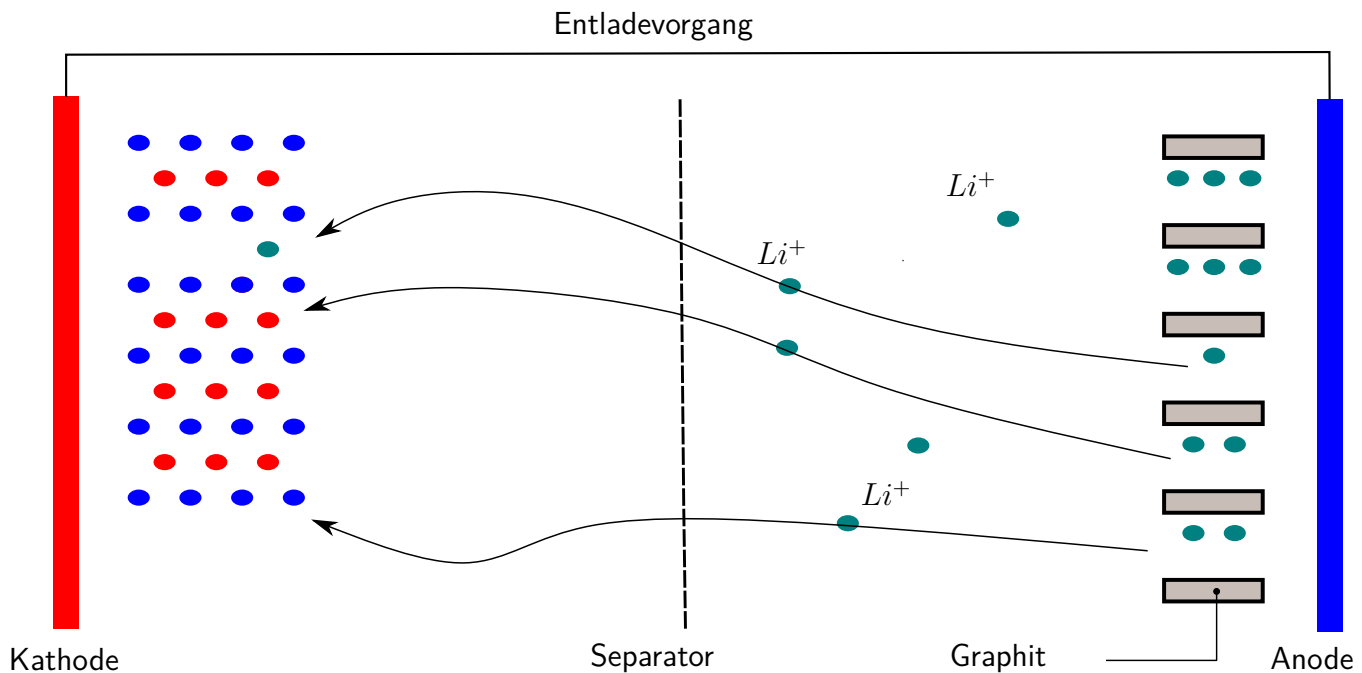


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Batterie, angelehnt an [2]

jeweilige Anwendung auszuwählen. Die wichtigsten Eigenschaften einer Batterie sind laut Brix:

- **Nennspannung:** Die deutsche Ausgabe des internationalen elektrotechnischen Wörterbuchs definiert die Nennspannung wie folgt: Die Nennspannung einer Zelle ist ein geeigneter und angenäherter Wert der Spannung zur Bezeichnung oder Identifizierung eines elektrochemischen Systems einer Zelle oder Batterie. Sie wird in $[V]$ angegeben und ist abhängig von den verwendeten Materialien. Da die nutzbare Energie einer Zelle das Produkt aus ihrer Kapazität und der Nennspannung ist, kann über diesen Zusammenhang die Nennspannung bestimmt werden.
- **Kapazität:** Die Kapazität ist die Menge der Ladung, die ein Akkumulator aufnehmen beziehungsweise abgeben kann. Die Kapazität wird in $[Ah]$ oder in $[As]$ beziehungsweise $[C]$ (Coulomb) angegeben, wobei gilt: $1 As = 1 C$.
- **Spezifische oder auch gravimetrische Energiedichte:** Die gravimetrische Energiedichte eines Akkumulators ist die Menge an abgegebener Energie pro Masseneinheit. Diese wird in $\left[\frac{Wh}{kg}\right]$ angegeben.
- **Energiedichte oder auch volumetrische Energiedichte:** Die volumetrische Energiedichte eines Akkumulators ist die Menge an abgegebener Energie pro Raumeinheit. Die Einheit der volumetrischen Energiedichte ist $\left[\frac{Wh}{dm^3}\right]$.
- **Leistungsdichte:** Die Leistungsdichte beschreibt die maximale Leistung, die ein Akkumulator pro Masseneinheit abgeben kann. Die Leistungsdichte hat die Einheit $\left[\frac{W}{kg}\right]$.
- **Selbstentladung:** Die Selbstentladung beschreibt den reversiblen Verlust der Kapazität über einen Zeitraum, welche eine Zelle nicht durch einen äußeren Stromkreis verliert. Sie wird bei Sekundärzellen meist in % der Nennkapazität pro Monat oder Jahr angegeben.
- **Zyklusfestigkeit:** Mit der Zyklusfestigkeit einer Zelle wird die Anzahl definierter Entlade- und Ladezyklen (Belastung und Ladung beispielsweise mit $1 C$), bis die Kapazität der Zelle einen bestimmten Wert der Nennkapazität (meist 80 %) aufweist, beschrieben.

C. Vor- und Nachteile

Wie in dem vorangegangenen Kapitel beschrieben, sind je nach Anwendung verschiedene Batterietypen anhand der Kenngrößen auszuwählen. In der Tabelle 1 werden Richtwerte für die jeweiligen Kenngrößen der unterschiedlichen Batterietypen aufgelistet.

Tabelle 1: Eigenschaften unterschiedlicher Batteriezellen [3]

Größe	Pb-Säure	NiCd	NiMH	NaNiCl	Li-Ionen
Gravimetrische Energiedichte $\left[\frac{Wh}{kg}\right]$	20-35	30-50	50-80	80-100	90-200
Leistungsdichte $\left[\frac{W}{kg}\right]$	100	600	1000	170	300-4000
Kalendarische Lebensdauer [Jahre]	3-5	5-15	<5	8-10	5-15
Zyklusfestigkeit [Zyklen]	1200	2000	1000	1500	500-4000
Sicherheit [+/-]	+	+	+	0	-
Umweltverträglichkeit [+/-]	0	-	0	+	0

Im Vergleich zu anderen Batterietypen hat die Lithium-Ionen-Batterie eine sehr hohe gravimetrische Energiedichte sowie eine hohe Zellspannung, Leistungsdichte und Zyklusfestigkeit. Außerdem weist diese aufgrund der geringen Selbstentladung und dem weitem Temperaturbereich für Lagerung und Betrieb eine sehr gute Lagerfähigkeit auf. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch die Sicherheit, denn durch mechanische Beschädigung wie z. B. Kurzschlüsse, unkontrollierte Überladung oder Tiefentladung können Lithium-Ionen-Akkus thermisch durchgehen. Dies kann bis zum Brand oder zur Explosion führen.

III. SPEICHERVERMÖGEN

A. Die Peukert-Gleichung

Je höher der Entladestrom, desto geringer ist die entnehmbare Kapazität der Batterie. Gründe hierfür sind die zunehmenden **Verluste am Innenwiderstand der Batterie** und die **begrenzten Geschwindigkeiten der elektrochemischen Prozesse** und der Transportvorgänge in der Batterie. Diese Abnahme lässt sich mithilfe der Peukert-Gleichung beschreiben [4].

$$t = \frac{C_p}{I_k} \cdot (I_N)^{k-1} \quad (1)$$

$$t \cdot I = C_N \cdot \left(\frac{I_N}{I}\right)^{k-1} = f(I) \quad (2)$$

mit

- C_p (die Peukert-Kapazität) ist das Ladungs-Speichervermögen in Ah bei einem Entladestrom von 1 A: $C_p = C_N \cdot (I_N = 1 A)$
- I ist der tatsächliche Entladestrom in Ampere
- $k \geq 1$ ist die dimensionslose Peukert-Zahl, auch Peukert-Exponent genannt

- $(1 A)^{k-1}$ ist der Korrekturterm für die Einheit Ampere
- $t \cdot I$ ist das Ladungs-Speichervermögen in Ah bei einem Entladestrom $I \neq 1 A$

Die Peukert-Zahl k gibt Auskunft darüber, wie gut das Speicherverhalten der Batterie bei hohen Entladeströmen ist. In der folgenden Tabelle 2 werden einige Batterietypen mit deren Peukert-Zahl k aufgelistet.

Tabelle 2: Darstellung der Peukert-Zahlen unterschiedlicher Batterietypen

Zelltyp	Peukert-Zahl
Lithium-Ionen	1,05
Alkali-Batterie	1,45
NiMH-Akku	1,09
Bleiakkumulator	1,1 - 1,3
ideale Batterie	1,0

Bei einer idealen Batterie mit $k = 1,0$ ist die Kapazität C_p nicht mehr vom Entladestrom I_N abhängig, da $(I_N)^{1-1} = (I_N)^0 = 1$. Somit gilt: $t = \frac{C_p}{I_k} = I \neq f(I)$.

B. Der Innenwiderstand einer Lithium-Ionen-Batterie

Die Abbildung 2 zeigt ein Modell einer Batterie mit deren Innenwiderstand. Durch erweitern des Modells mit RC-Gliedern wird das Modell zunehmend genauer, aber langsamer in der Modellierung.

Jede Batterie hat einen Innenwiderstand, welcher Einfluss auf den Stromfluss hat. Laut dem ohmschen Gesetz $R = \frac{U}{I}$ bzw. $U = I \cdot R$ wird bei hohen

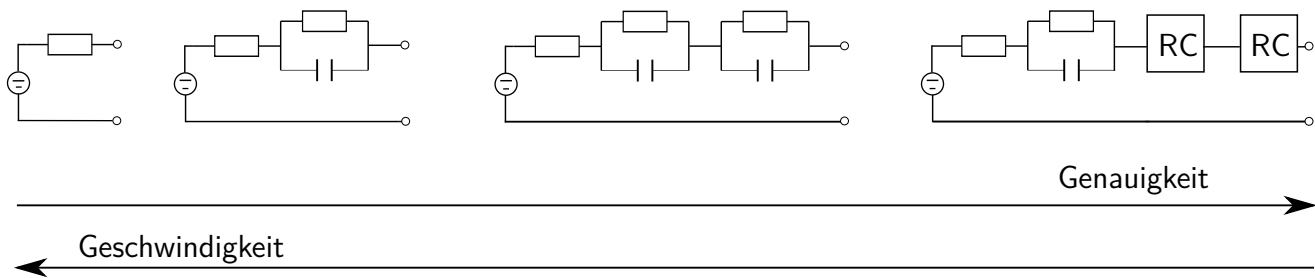


Abbildung 2: Batteriemodelle basierend auf elektrische Schaltkreisen, angelehnt an [5]

Strömen eine ebenfalls hohe Spannung am Innenwiderstand R_I abfallen. Die abfallende Spannung erzeugt eine Verlustleistung nach $P = U \cdot I$. Diese erzeugt eine Erwärmung am Innenwiderstand, d. h. hohe Ströme bewirken eine steigende Wärmeentwicklung am Innenwiderstand. Daher sind für einen zuverlässigen Betrieb die Auswahl einer geeigneten Zellchemie und einer ausreichenden Kühlleistung erforderlich. Ist Letzteres nicht gegeben, haben u. a. die entstehenden Temperaturen und damit einhergehenden Zellreaktionen einen negativen Einfluss auf die Zyklenfestigkeit bzw. Lebensdauer der Batterie[6]. Je höher der Strom ist, desto weniger Kapazität kann der Batterie entnommen werden. Abbildung 3 zeigt die Entladekapazität bei zwei verschiedenen Strömen in Abhängigkeit der Zyklen.

Der Innenwiderstand einer Batterie setzt sich zusammen aus verschiedenen ohmschen Anteilen der einzelnen Komponenten. Dies sind ohmsche Widerstände des Elektrolyten, des Aktivmaterials, gegebenenfalls der Korrosionsschichten, des Ableiters und der Zellverbinder. Einflussgrößen auf den Innenwiderstand sind größtenteils die **Temperatur** und der **SoC** (State of Charge). Der SoC ist definiert als das Verhältnis der entnehmbaren Ladung zur Kapazität. Der SoC hat den Wertebereich 0% – 100% bzw. 0 – 1. Der **DoD** (Depth of Discharge) ist das Verhältnis der entnommenen Ladung zur Kapazität. Die folgende Gleichung (3) zeigt die Umrechnung der beiden Größen:

$$SoC = 1 - DoD \quad (3)$$

Laut der Arrhenius-Gleichung (7) begünstigt eine hohe Temperatur grundsätzlich chemische Reaktionen. Dies betrifft beispielsweise den Ladungstransport im Elektrolyten. Mit zunehmender Temperatur steigt der ohmsche Widerstand in Metallen, wodurch der

Ladungstransport in den Elektroden verlangsamt wird. Die Abhängigkeit des Innenwiderstands von der Temperatur ist ein Zusammenspiel von mehreren Komponenten. Insgesamt betrachtet, hat der Innenwiderstand eine exponentielle Abnahme. In einem Temperaturbereich von 0°C bis 35°C kann ebenfalls der lineare Ansatz nach (4) gefunden werden [7].

$$R(T) = R(T_N) \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T - T_N)) \quad (4)$$

mit

- T ist die Batterietemperatur während der Entladung
- T_N ist die Normtemperatur während der Entladung
- α_T ist der Temperaturkoeffizient, welcher vom Batterietyp abhängig ist

Die Temperaturempfindlichkeit ist bei einer Lithium-Ionen-Batterie jedoch allgemein niedrig. Der Temperaturbereich liegt zwischen 0°C und 60°C. Dies stellt einen großen Vorteil dieser Zelltechnologie in vielen Anwendungsbereichen dar. Der Innenwiderstand nimmt mit sinkendem SoC zu, weil die Konzentration an freien Lithium-Ionen im Elektrolyt abnimmt. Je älter die Batterie, desto höher der Innenwiderstand und desto geringer das Speichervermögen der Batterie.

C. Reaktionsgeschwindigkeit und Temperaturabhängigkeit

Chemische Reaktionen können niemals sprunghaft verlaufen. Es wird stets eine gewisse Zeit t benötigt bis die Reaktion abgelaufen ist. Der Einbau von Lithium-Ionen in das Atomgitter von Anode oder Kathode wird als Interkalation bezeichnet. Der Ausbau entsprechend als Deinterkalation. Beispielhaft

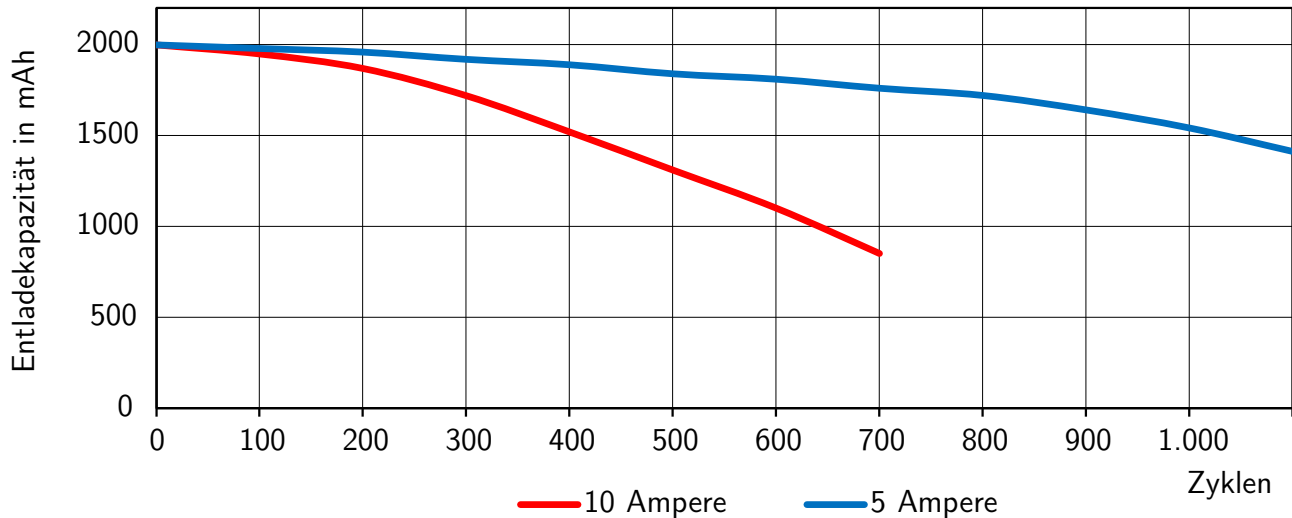
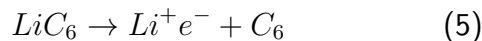
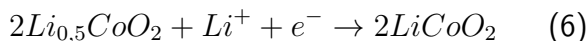


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Batterie-Kapazitätsentnahme bei verschiedenen Strömen, angelehnt an[6]

für eine vollständige Entladung der Zelle laufen an den Elektroden die folgenden Reaktionen ab: An der Anode, die üblicherweise aus Graphit C_6 besteht, werden Lithium-Ionen Li^+ aus der Struktur deinterkaliert [8].



An der Kathode, hier beispielhaft für das Materialsystem $LiCoO_2$, werden Lithium-Ionen interkaliert [8].



Beim Ladevorgang laufen diese Reaktionen entsprechend umgekehrt ab. Der Vorgang der Interkalation von Lithium-Ionen ist hierbei entscheidend für die Haltbarkeit der Zelle. Bei Verwendung von metallischem Lithium statt Graphit kann die Zelle ebenfalls betrieben werden, jedoch bilden sich schon nach wenigen Zyklen dornenförmige Lithium-Ablagerungen auf der metallischen Elektrode. Dies geschieht aufgrund der nicht stattfindenden Interkalation. Diese Ablagerungen werden Dendrite genannt und können die Zelle kurzschließen und somit zerstören [8].

Die Arrhenius-Gleichung (7) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k und der Temperatur T :

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_A}{RT}} \quad (7)$$

mit

- A als Frequenzfaktor
- E_A als Aktivierungsenergie
- R als allgemeine Gaskonstante

Laut der Arrhenius-Gleichung (7) laufen chemische Reaktionen bei höherer Temperatur schneller ab. Bei hohen Temperaturen ab $60^\circ C$ werden nicht nur die Hauptreaktionen der Lithium-Ionen-Batterie, sondern auch die unerwünschten Alterungsreaktionen begünstigt, was sich negativ auf die Kapazitätsentnahme auswirkt [7].

IV. VERBESSERUNGEN DER LITHIUM-IONEN-BATTERIE

A. Neuartiges Kathodenmaterial

Lithium-Ionen-Batteriezellen aus dem Consumer-Bereich, wie sie zum Beispiel in Mobiltelefonen oder Laptops eingesetzt werden, und Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge basieren auf dem identischen elektrochemischen Grundprinzip. In beiden Fällen ist Ziel, auf kleinstem Raum eine möglichst hohe Energiemenge speichern zu können. Für Elektrofahrzeuge gelten jedoch wesentlich strengere Sicherheitsvorschriften, obwohl diese hohe Leistungsanforderungen mit hohen

Lade- und Entladeströme erfüllen müssen. Zukünftige Speichertechnologien werden daher gänzlich neue Voraussetzungen mitbringen müssen [9].

Forscher des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) haben strukturelle Veränderungen während der Synthese von Kathodenmaterial untersucht. Hierbei konnten neue Erkenntnisse über die Degradationsmechanismen gewonnen werden, welche bei der Entwicklung eines zukünftigen Typs von Lithium-Ionen-Akkus hilfreich sind. Dadurch konnte das Speichervermögen um bis zu 30 % erhöht werden [10]. Basierend auf diesen dreidimensionalen Elektrodenstrukturen soll des Weiteren die Machbarkeit einer völlig neuartigen Bauweise für polymerbasierte Festkörperbatterien untersucht werden. Dazu wird innerhalb der Porenstruktur eine Multi-Lagen-Beschichtung, bestehend aus den Batterieelektroden und dem Festkörperelektrolyt, aufgebracht. Die große innere Oberfläche des Schaums (siehe Abbildung 4) ermöglicht dabei die Realisierung einer wesentlich höheren Leistungsdichte im Vergleich zu Batterien, die im klassischen, zweidimensionalen Lagendesign aufgebaut sind. Zusätzlich wird hierbei erstmals der Einsatz eines Polymerelektrolyten erprobt, der durch seine besonderen Eigenschaften die Sicherheit der finalen Batteriezelle deutlich erhöht. Der vorgestellte Aufbau ermöglicht zudem nahezu beliebig wählbare äußere Formen, wie zum Beispiel zylindrische, sphärische oder unregelmäßige Geometrien. Dadurch sind Einpassungen von Batteriezellen in jeden gegebenen Einbauraum denkbar. Die unterschiedlichen Zelltypen sind nicht nur für den Einsatz in mobilen Anwendungen mit hoher Leistungsanforderung prädestiniert, sondern erfüllen auch den Anspruch zum Aufbau langlebiger und sicherer stationärer Speicher mit der Fähigkeit zur Pufferung von Lastspitzen [11].

B. Erweiterung der Peukert-Gleichung

Die Peukert-Gleichung (2) wurde bereits in Kapitel 3 aufgeführt. Dieser Ausdruck beschreibt die maximale Kapazität, die einer Batterie entnommen werden kann. Die Gleichung gilt jedoch nur für Mittelstromlasten. Die Peukert-Gleichung kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$t_1(I_1) = \frac{Q_{ra}}{I_{ra}} \cdot \left(\frac{I_{ra}}{I_1} \right)^k \quad (8)$$

Bei hohen Entladeströmen kann der Batterie nicht so viel Kapazität entnommen werden. Diese Effekte

sind in der Peukert-Gleichung jedoch noch nicht berücksichtigt. Die Peukert-Gleichung wird erweitert und es ergibt sich die Peukert-Bend-Gleichung [12]:

$$t_1(I_1) = \frac{Q_{ra}}{I_{ra}} \cdot \left(\frac{I_{ra}}{1A} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1A}{I_1} \right)^{k_2} \cdot \sqrt{\frac{1}{s_1 \left(\frac{I_1}{s_2} - 1 \right) + 1}} \quad (9)$$

mit

- ra ist die Nennkapazität der Zelle im Normalzustand
- Q_p Batteriekapazität bei 1 A Entladestrom
- t_1 ist die Entladezeit der Batterie
- T ist die Entladezeit bei 1 A Entladestrom
- I ist der Entladestrom von 1 A
- I_1 ist der ausgewählte Entladestrom
- I_{ra} ist der Nennentladestrom
- Q_{ra} ist die Nennkapazität beim Entladestrom I_{ra}
- k, k_2 sind die Peukert-Exponenten mit den "fitting-Parametern"
- s_1 ist der Peukert-Biegeanpassungsparameter
- s_2 ist der Peukert-Biegeanpassungsparameter

Die Peukert-Gleichung wurde so angepasst, dass die Effekte, welche die Kapazitätsentnahme bei hohen Entladeströmen verringern, ebenfalls berücksichtigt werden [12].

C. Silizium und Silizium-Kohlenstoff-Komposite

Allgemein ist die Lithium-Ionen-Batterie sehr vielseitig in Bezug auf das Elektrodenmaterial. Oft ist Graphit als Anodenmaterial eingesetzt, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Graphit dehnt sich beim Laden kaum aus, was sehr vorteilhaft ist. Silizium kann die Energiedichte im Vergleich zu Graphit sogar **verdreifachen**. Der Nachteil von Silizium ist, dass es sich beim Laden sehr stark ausdehnt und bei der Entladung wieder zusammenzieht. Nach einigen Ladezyklen sind die dünnen Siliziumschichten oder Siliziumpartikel pulverisiert und die Speicherung von

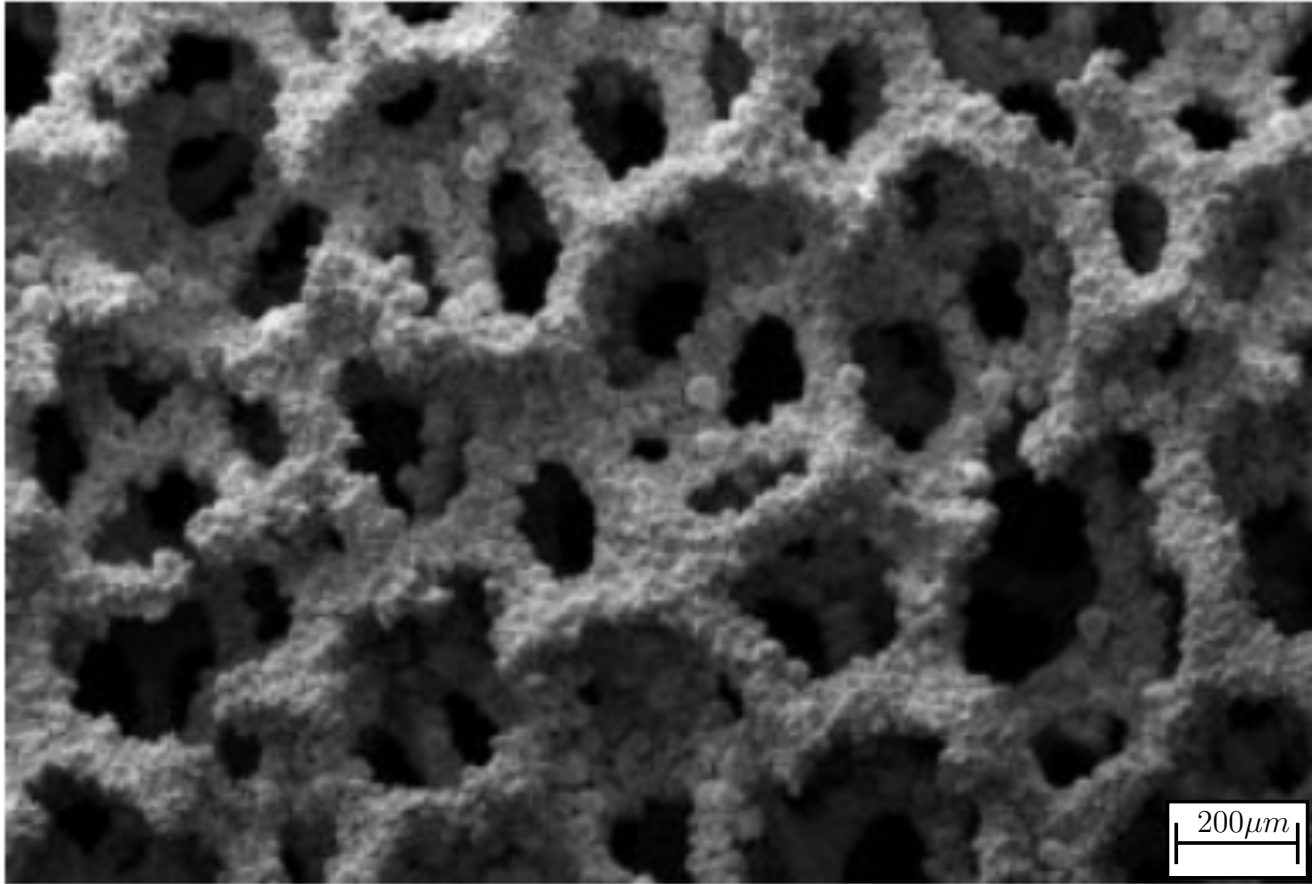


Abbildung 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines offenzelligen Metallschaums, angelehnt an [9]

Lithium-Ionen funktioniert nicht mehr so gut. Durch diesen Effekt wird die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Zelle stark verkürzt. Ein möglicher Lösungsansatz um dieses Problem zu umgehen, ist die Silizium-Kohlenstoff-Komposite. Hierbei setzt man einen Verbundwerkstoff aus Silizium Si und Kohlenstoff C als Anodenmaterial ein. Dieses Verbundmaterial besitzt Eigenschaften, die sich von denen der Grundbestandteile wesentlich unterscheiden. Dabei dient Kohlenstoff C lediglich als Abstandhalter und elektrischer Leiter zwischen den Siliziumpartikeln. Somit kann die hohe Speicherkapazität des Siliziums genutzt und gleichzeitig eine erheblich verbesserte Lebensdauer erzielt werden [13].

V. FAZIT

Dieses wissenschaftliche Paper stellt zuerst allgemeine Anforderungen an eine Batterie vor. Wichtige Kenngrößen einer Batterie sind vor allem die Energiedichte und die Leistungsdichte. Anhand die-

ser Kenngrößen wurden die Vorteile der Lithium-Ionen-Batterie dargestellt. Die Problematik, dass bei steigendem Entladestrom das Speichervermögen sinkt, wurde durch die Peukert-Gleichung (2) erläutert. Die wesentlichen Gründe für das sinkende Speichervermögen bei hohen Entladeströmen wurden genannt. Diese sind zum einen die Verluste am Innenwiderstand der Batterie und zum anderen die begrenzten Geschwindigkeiten der elektrochemischen Prozesse. Die Temperatur hat ebenfalls Einfluss auf das Speichervermögen. Die Arrhenius-Gleichung (7) stellt den Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k und der Temperatur T dar. Das Paper zeigt ebenfalls Möglichkeiten zur Verbesserung des Batterietyps auf. Durch ein neuartiges Kathodenmaterial kann das Speichervermögen stark verbessert werden. Mathematisch werden die Effekte, welche die entnehmbare Kapazität der Batterie mindern, durch die Peukert-Bend-Gleichung (9) berücksichtigt. Durch Silizium und Silizium-

Kohlenstoff-Komposite kann die Energiedichte der Batterie deutlich verbessert werden. Hierbei kann das hohe Speichervermögen von Silizium genutzt werden und die Lebensdauer des Energiespeichers wird erheblich verbessert. Das Forschungsgebiet der Lithium-Ionen-Batterien wird weiterhin spannend bleiben. Es bietet noch Verbesserungspotential in den Bereichen Energiedichte, Leistungsdichte, Kosten und vor allem Sicherheit. Die Batterieforschung gewinnt allgemein zunehmend an Relevanz z. B. aufgrund der aufblühenden Elektromobilität.

- [12] Christoph Nebl u. a. *Vorhersage einer konstanten Leistungsabgabe von Lithium-Ionen-Zellen bei hohen Belastungen*. 2020.
- [13] *Lithium-Ionen-Batterien*. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infportal/lexikon/lithium-ionen-batterien/> (besucht am 10.04.2021).

LITERATUR

- [1] Reiner Korthauer. *Handbuch lithium-ionen-batterien*. Springer Verlag, 2013.
- [2] Schmitz Patrick. *Elektrische Verbindung von zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen zur Herstellung von Energiespeichersystemen*. München, 2019.
- [3] Jonathan Brix. *Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems*. 2015.
- [4] Carmen Meuser. *Physikalische und chemische Charakterisierung von Lithiumionenzellen*. 2011.
- [5] Peter Keil und Andreas Jossen. *Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen*. 2006.
- [6] IKT für Elektromobilität. *Kompendium: Li-Ionen-Batterien*. 2015.
- [7] Agnes Klei. *Experimentelle Untersuchung von Batteriesystemen im simulierten niedrigen Erdborbit*. 2017.
- [8] Michael Schönleber. *Verfahren zur Charakterisierung des Niederfrequenzverhaltens von Lithium-Ionen Batterien*. 2017.
- [9] *Energiespeicher der nächsten Generation*. 2017. URL: <https://www.transforming-cities.de/energiespeicher-der-naechsten-generation/> (besucht am 09.04.2021).
- [10] Patrick Schäfer. *Neues Kathodenmaterial erhöht Kapazität von Li-Ion-Akkus*. 2019. URL: <https://www.springerprofessional.de/batterie/werkstoffe/neues-kathodenmaterial-erhoeht-kapazitaet-von-li-ion-akkus/174720701> (besucht am 09.04.2021).
- [11] *Lithium-Ionen-Batterien mit neuartigen Elektrodenstrukturen*. 2017. URL: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/lithium-ionen-batterien-mit-neuartigen-elektrodenstrukturen/> (besucht am 09.04.2021).