



Lara Grabitz, *1997
Benedikt Alt-Epping, *1999
Amandus Krause, *1997

Schule:
2° Campus (Schülerakademie des WWF)

Eingang der Arbeit:
Januar 2016

Zur Veröffentlichung angenommen:
April 2016

Die Batterie der Zukunft

Bau und Optimierung einer Dual-Graphit-Zelle

Batterien sind die Grundlage für die Elektromobilität, derzeit aber noch die größte Herausforderung. Gute Werte erreicht derzeit die Lithium-Ionen-Batterie, sie ist jedoch gefährlich und aus giftigen Materialien. Wir haben eine Alternative genauer erforscht, die nicht nur billiger, sondern vor allem umweltfreundlicher ist. Eine Batterie aus Graphit: Die Dual-Graphit-Zelle.

1 Einleitung

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken und die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, müssen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2050 weltweit deutlich reduziert werden. Eine besondere Rolle kommt dabei dem Sektor Verkehr zu, denn er ist Ursache für derzeit knapp ein Viertel aller deutschlandweiten Emissionen. [1]

Lösung in diesem Bereich böte der Umstieg auf die Elektromobilität, deren Einsatz heutzutage jedoch noch vor großen Herausforderungen steht: Ein Elektroauto kostet viel in der Anschaffung, hat eine geringe Reichweite und braucht lange zum Aufladen. Der häufigste momentan verwendete Akkumulator in der Elektromobilität ist der Lithium-Ionen-Akku. Diese Art von Batterie ist schon recht gut erforscht und optimiert, birgt

allerdings einige Risiken, da einige verwendete Materialien hochgiftig sind und bei einer Fehlfunktion (Kurzschluss oder Überladen) die Gefahr eines Brandes besteht.

Durch Recherchen sind wir auf eine Alternative zur Lithium-Ionen-Batterie gestoßen: Die Dual-Graphit-Batterie. Statt einer giftigen Kathode, beispielsweise Lithium-Cobalt-Oxid, sind beide Elektroden aus Graphit, also reinem Kohlenstoff. Das macht die Batterie sowohl sicherer als auch billiger, da das Kathodenmaterial in einer herkömmlichen Batterie der teuerste Bestandteil ist. [2]

Die Forschungsfrage, die wir uns gestellt haben, lautet deshalb: Ist die Dual-Graphit-Batterie eine sichere und unter Umweltaspekten geeignete Alternative zur Lithium-Ionen-Batterie?

Unsere Arbeit bestand darin, dass wir Zellen nach dem Vorbild der Dual-Graphit-Batterie zusammenbauten. In der ersten Versuchsreihe verglichen wir die selbstgebaute Dual-Graphit-Batterie mit einer Lithium-Ionen-Batterie und einer Nickel-Cadmium-Batterie. In einer zweiten Forschungsphase verwendeten wir verschiedene Zellentypen, um Fehler der vorangegangenen Versuchsreihe zu beheben und die spezifische Kapazität zu erhöhen. In einer dritten Versuchsreihe führten wir ein Screening möglichst vieler verschiedener Elektrolyte und Elektroden durch.

Die Forschung an Batterien mit Elektroden aus Graphit ist zwar noch recht jung, hat aber großes Potenzial. Das japanische Unternehmen „Power Japan +“ hat bereits angekündigt, die Dual-Graphit-Batterie bald in Serie auf den Markt

bringen zu wollen. Sie soll im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie 20 mal so schnell aufladbar sein, thermisch sehr stabil sein und eine hohe Zyklenstabilität (ca. 3000 Ladezyklen) besitzen. [3]

2 Theorie

2.1 Begriffsdefinitionen

Eine Zelle dient der Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie in elektrische Energie. Dabei ist eine Zelle die kleinste Einheit, bestehend aus zwei Elektroden und dem Elektrolyten. Als Batterie wird der Zusammenschluss mehrerer Zellen bezeichnet. Eine primäre Batterie kann nicht wieder aufgeladen werden, ihre Entladung ist also irreversibel. Als Akkumulator bezeichnet man eine Sekundärzelle, also eine wiederaufladbare Zelle.

2.2 Graphit als Elektrodenmaterial

Graphit besteht aus hexagonalen, planaren Kohlenstoffschichten. Aufgrund seines redoxamphotereren Charakters eignet sich Graphit sehr gut, um sowohl Anionen als auch Kationen einzulagern. Die Ionen lagern sich zwischen die durch schwach ausgebildete Van-der-Waals-Kräfte zusammengehaltenen Graphitschichten ein. Der Abstand zwischen zwei Graphitschichten beträgt 0,335 nm.

Dazu muss beim ersten Einlagern von großen Ionen eine gewisse Energiemenge aufgebracht werden, um die Graphitschichten aufzuweiten, damit die Ionen genug Platz haben. Dieses nennt man die Aktivierung im ersten Ladezyklus. [4]

Die Einlagerung bzw. Intercalation von Ionen in Graphit verläuft stufenförmig, sodass nach und nach immer mehr Graphitschichten mit Ionen besetzt sind.

2.3 Funktionsprinzipien beider Batterien

Nachfolgend sollen die Funktionsweisen der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) und der Dual-Graphit-Batterie (DGB) erklärt und verglichen werden.

2.3.1 Die Lithium-Ionen-Batterie

Beim Aufladen der Lithium-Ionen-Batterie deintercaliert für jedes der Kathode (in unserem Beispiel Abb. 1 LiMn_2O_4) entzogene Elektron ein Lithiumion aus dem Schichtgitter. [5] Diese deintercalierten Lithiumionen gehen in den Elektrolyten über und werden dann im

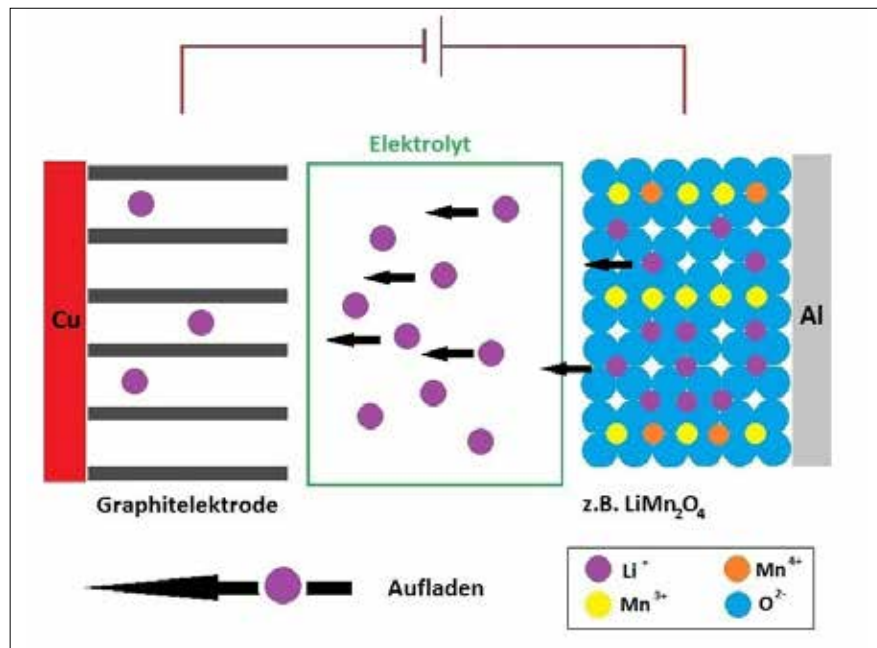


Abb. 1: Schematische Darstellung des Ladevorgangs der LIB; eigene Graphik.

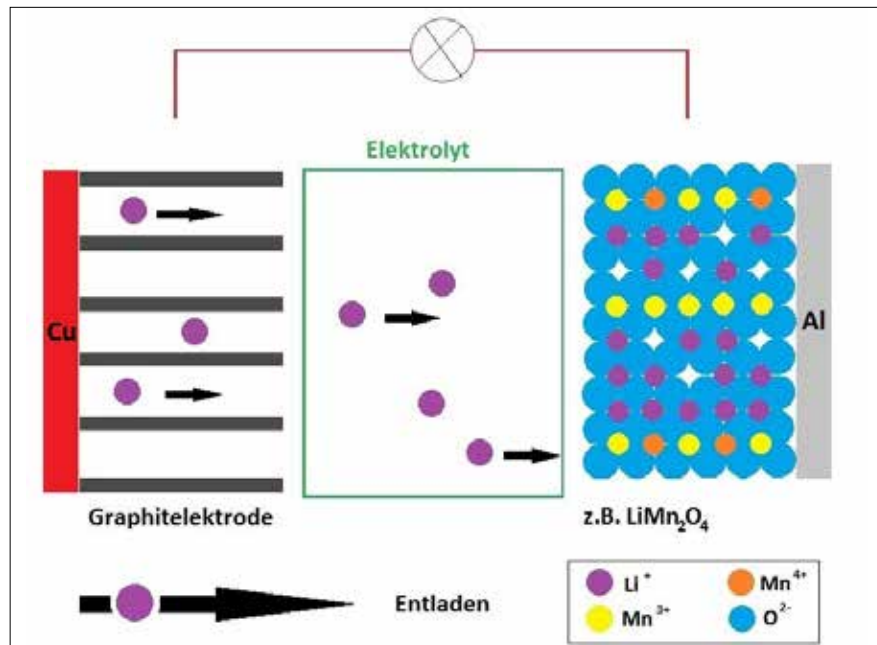
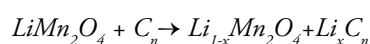


Abb. 2: Entladevorgang der LIB; eigene Graphik.

hexagonalen Schichtgitter des Graphits wieder eingelagert. Beim Entladen (siehe Abb. 2) werden die im Graphitgitter intercalierten Lithiumionen deintercaliert und wieder in die Kathode eingelagert.

Da die Ionen sich ständig zwischen Anode und Kathode hin und her bewegen, werden diese Akkumulatoren wegen des sogenannten Schaukelstuhleffekts auch „rocking-chair-Akkumulatoren“ genannt.

Die zu Grunde liegende Reaktionsgleichung lautet:



Der Lithium-Ionen-Akkumulator ist der momentan leistungsfähigste wiederaufladbare Batterietyp weltweit und zeichnet sich durch eine hohe Zyklenstabilität und eine hohe Energiedichte (aktuell 90 bis 250 Wh/kg) dank der für Metalle geringen molaren Masse von Lithium ($M = 6,941 \text{ g/mol}$) aus. [6] Besonders wichtig für den reibungslosen Einsatz der Lithium-Ionen-Batterie ist die SEI-Schutzschicht (Solid Electrolyte Interphase), die sich während der ersten sehr langsamen Ladezyklen bildet, dem sogenannten Formieren eines Akkumulators. Die SEI ist nur für Lithiumionen permeabel und verhindert dadurch weitere

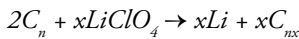
Zersetzungsreaktionen des Elektrolyten an der Elektrode.

2.3.2 Die Dual-Graphit-Batterie

Beim Laden der Dual-Graphit-Batterie intercalieren die Ionen in die Graphitelektroden; die Anionen (ClO_4^-) in die Kathode, die Kationen (Li^+) in die Anode (siehe Abb. 3). Die Ionen sind nur im Leitsalz des Elektrolyten vorhanden (z. B. Lithiumperchlorat) und nicht wie bei der Lithium-Ionen-Batterie in einer der Elektroden. Der Elektrolyt fungiert als eine Art Aktivmaterial.

Auch die Ionen des Lösungsmittels des Elektrolyten können in die Elektroden intercalieren und somit die Graphitstruktur zerstören (exfolieren), da sie meist sehr groß sind. Daher wird auch in der Dual-Graphit-Batterie eine gute SEI benötigt.

Die zu Grunde liegende Reaktionsgleichung lautet:



3 Bau und Vergleich erster eigener Batterien

3.1 Die Lithium-Ionen-Batterie

Die Anode der Lithium-Ionen-Batterie besteht aus Graphit, der auf eine Kupferfolie aufgebracht wurde und ein Bindemittel enthält. Die Kathode besteht aus Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid (NCM) und wurde auf eine Alufolie aufgebracht. Beide Folien sind jeweils von beiden Seiten mit dem jeweiligen Material beschichtet. Die Elektroden wurden an einer sogenannten Battery Line am Fließband hergestellt. Dieses gewährleistet, dass alle Elektroden identisch schwer und groß sind. 19 Elektroden jeder Sorte wurden von einer professionellen Stapelmaschine jeweils mit einem Separator dazwischen übereinandergestapelt, sodass sich 19 parallel geschaltete Lithium-Ionen-Batterien in einem Gehäuse aus beschichtetem Aluminium befinden. Als Stromableitermaterialien dienen Aluminium und Nickel.

In der Lithium-Ionen-Batterie haben wir eine Mischung aus organischen Carbonaten mit LiPF_6 (Lithiumhexafluorophosphat) als Leitsalz verwendet. Dieser gängige Elektrolyt war bereits fertig gemischt und wurde uns vom Meet Batterieforschungszentrum zur Verfügung

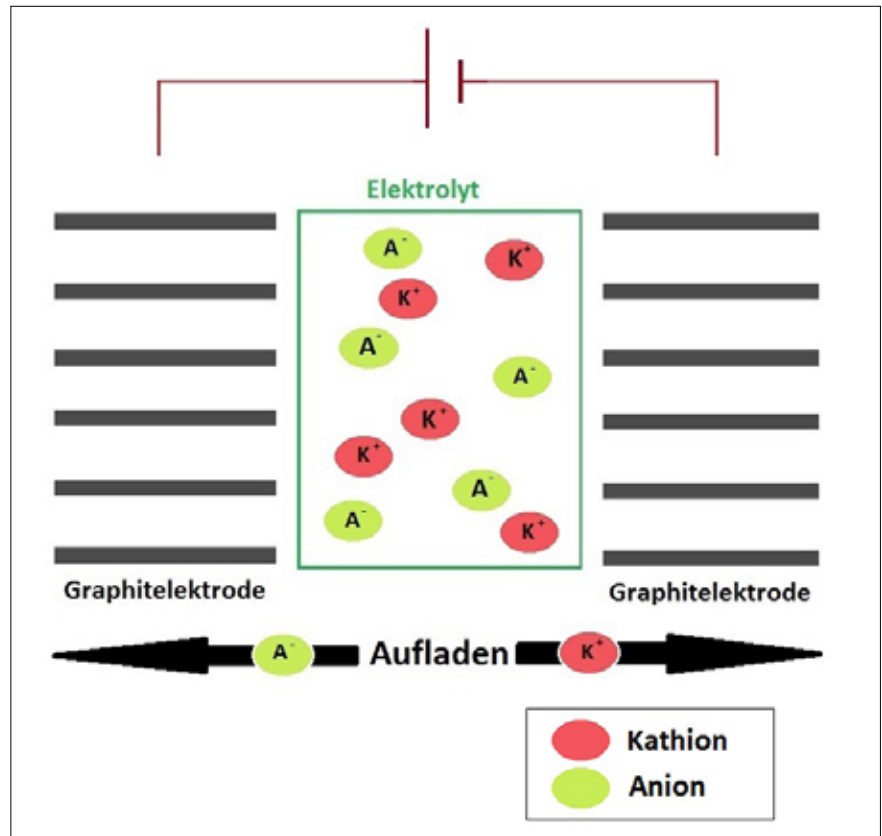


Abb. 3: Aufladevorgang der DGB; eigene Graphik.

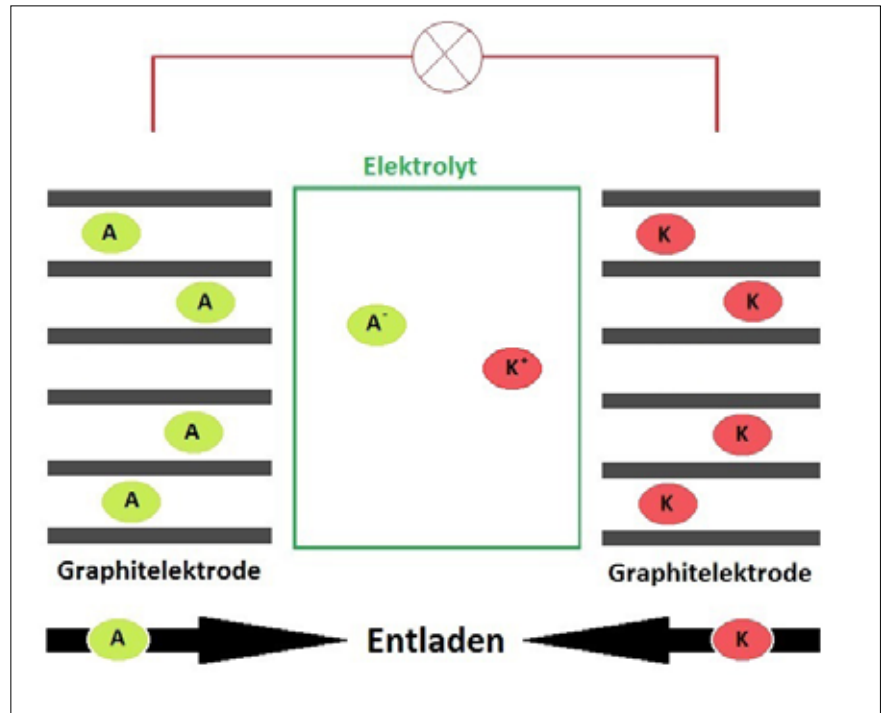


Abb. 4: Entladevorgang der DGB; eigene Graphik.

gestellt. Er besteht aus einem Gemisch einiger Carbonate und dem Zusatz einiger Spezial-Additive, die allerdings geheim sind. Lithiumhexafluorophosphat ist in der EU-Gefahrenstoffkennzeichnung als giftig, ätzend und reizend klassifiziert. Außerdem kann sich in Verbindung mit

Restwasser, das sich auch in einem Trockenraum nicht komplett ausschließen lässt, Fluorwasserstoffsäure bilden (HF). Fluorwasserstoffsäure, auch Flusssäure genannt, ist ein starkes Kontaktgift, das sofort von der Haut resorbiert wird und als sehr giftig und ätzend klassifiziert ist.

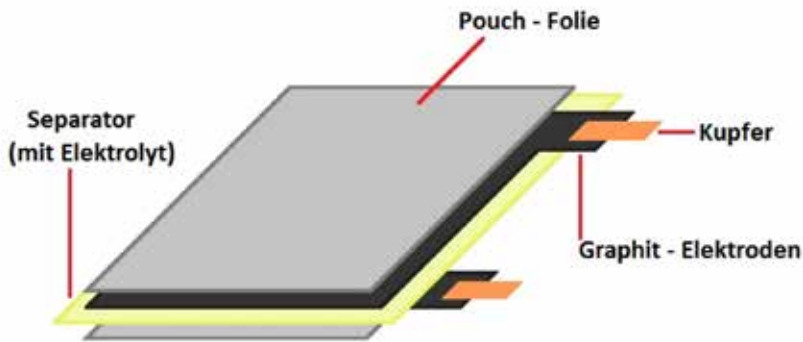


Abb. 5: Schematische Darstellung der DGZ, eigene Graphik.

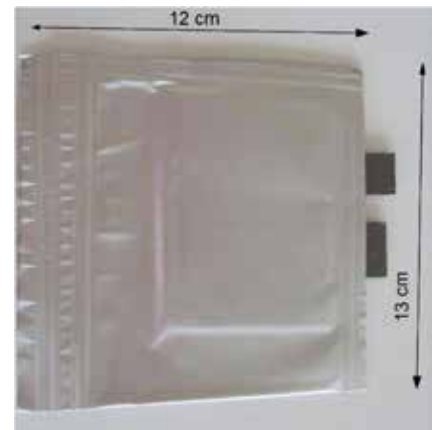


Abb. 6 : Foto der selbstgebauten DGZ.

Die Lithium-Ionen-Batterie wurde mit ausreichend Elektrolyt befüllt und an einem Batteriezuklisierer formiert. Das bei der Formierung entstandene Gas wurde durch ein Aufschneiden der Zelle und erneutes Verschweißen entfernt. Diese so genannte Lithiumionen-Pouchzelle ist vom Design die Vorlage für unsere Dual-Graphit-Batterie. Die Lithium-Ionen-Batterie wog 139,8 g, wies eine Energiedichte von 171,24 Wh/kg, eine Spannung von 4,2 V und eine Kapazität von 5,7 Ah auf.

3.2 Die Dual-Graphit-Zelle

Die Dual-Graphit-Zelle besteht aus einer bindemittelfreien und freistehenden (d.h. nicht auf einer Metallfolie befindlichen) Graphitanode und einer Graphitkathode (Material Keratherm Graphit S 900), die jeweils ca. 70 cm² groß sind. Als Vorbild für unsere Batterie dient das „Kohlenstoffsandwich“. [7]

Als Elektrolyt wurden 10 ml einer Lösung bestehend aus Propylencarbonat und Dimethylcarbonat im Verhältnis 4:6 mit 1M Lithiumperchlorat (LiClO₄) als Leitsalz versetzt. Dazu wurden zuerst 10,6 g LiClO₄ in einen Erlenmeyerkolben eingewogen und mit 40 ml PC und 60 ml DMC versetzt und für 30 min auf dem Magnetrührer gerührt.

Wir haben diesen Elektrolyten gewählt, weil Propylencarbonat alleine nicht in der Lage ist, eine SEI zu bilden, und wir daher noch Dimethylcarbonat hinzugeben mussten, damit sich eine SEI bilden kann. [7] Dimethylcarbonat ist in der EU-Gefahrenstoffkennzeichnung als leicht-entzündlich, Propylencarbonat als reizend klassifiziert. Das Leitsalz LiClO₄ ist als gesundheitsschädlich und brandfördernd klassifiziert, ist aber im Vergleich

zu dem üblich verwendeten LiPF₆ fluorfrei, wodurch keine Flusssäure entstehen kann und das Recycling erleichtert wird.

Um einen Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden zu vermeiden, wurde ein Glasfaserseparator (siehe Abb. 5) (Whatman grade GF/D, ca. 88 cm²) verwendet, der auch gleichzeitig die Aufgabe erfüllt, den Elektrolyten aufzusaugen und zwischen den beiden Elektroden zu halten. Das Gehäuse der Zelle besteht aus so genannter Pouchfolie, die normalerweise zum Verpacken von Kaffee verwendet wird. Sie besteht aus mit Polymeren beschichtetem Aluminium. Diese Folie kann man, dank der Polymerbeschichtung, schweißen. Wir haben zwei Seiten verschweißt, dann den Elektrolyten auf den Separator gegeben und letztendlich die letzte Seite unter Vakuum verschweißt (siehe Abb. 6). Die von uns selbstgebaute Dual-Graphit-Zelle (siehe Abb. 6) wog 21,67 g, hatte eine Kapazität von 0,0314 Ah, eine Energiedichte von 5,06 Wh/kg und eine Spannung von 3,5 V.

3.3 Vergleich des Kathodenmaterials der beiden Batterietypen

In der Lithium-Ionen-Batterie ist Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid (NCM) als Kathodenmaterial verwendet worden, in der Dual-Graphit-Zelle Graphit. Graphit ist deutlich günstiger als NCM. Da das Kathodenmaterial 46 % der Gesamtkosten einer Batterie ausmacht, liegt hier ein großes Sparpotenzial [8]. Kostengünstigere Batterien könnten helfen, die Elektromobilität weiter zu etablieren.

3.4 Laden und Funktionstüchtigkeit

Wir haben die beiden verschiedenen Batterien an einem Zuklisierer der Firma Maccor laden lassen. Zuerst sollte

die Dual-Graphit-Zelle angeschlossen und geladen werden, beim Anschließen brach jedoch eine der beiden freistehenden Ableiterelektroden ab. Um die Zelle trotzdem testen zu können, wurde Kupferfolie um die abgebrochene Elektrode gewickelt und mit Krokodilklemmen an den Zuklisierer angeschlossen.

Die Dual-Graphit-Zelle wurde anschließend für 24 h bei einer Ladespannung von 4,5 V geladen. Um die Zelle nach dem Laden auf ihre Funktionstüchtigkeit zu testen, wurde sie an ein Multimeter und an eine kleine LED Lampe angeschlossen. Dabei stellte sich heraus, dass die Dual-Graphit-Zelle funktionstüchtig ist. Die Lithium-Ionen-Batterie wurde am Zuklisierer mit einer Ladespannung von 4,2 V dreimal bei 0,5 A bis zur theoretischen Kapazität geladen (siehe Abb. 7, Seite 34) und entladen (drei Zyklen). Im vierten Zyklus wurde die Batterie bei 5 A über 2,33 h bis zur theoretischen Kapazität geladen und anschließend für die Versuche verwendet.

Die beim Modellauto mitgelieferte Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd) wurde mit dem mitgelieferten Ladegerät an der Steckdose aufgeladen.

Die Schwankungen der Ladekurve der Dual-Graphit-Zelle zwischen 15 und 20 mAh (siehe Abb. 8, Seite 34) lassen sich durch einen Wackelkontakt an den Krokodilklemmen und den Stromableitern erklären.

3.5 Reichweitentest

In einem Versuch testeten wir die verschiedenen Batterien auf ihre Funktionstüchtigkeit und gespeicherte Energie. Dazu bauten wir sie in ferngesteuerte Modellautos des BMW i8 (Maßstab

1:14) ein. Tab. 1 zeigt die Ergebnisse. Die selbstgebaute Dual-Graphit-Zelle konnte mit einer Ausgangsspannung von 3,49 V lediglich eine LED betreiben. Das Modellauto konnte nicht betrieben werden. Mit der Nickel-Cadmium-Batterie fuhr das Auto am schnellsten (7,19 km/h). Jedoch hörte das Auto nach ca. 30 min auf zu fahren, während das Auto mit der Lithium-Ionen-Batterie mit konstanter Geschwindigkeit (6,14 km/h) auch nach 30 min noch weiterfuhr. Ein Grund für die hohe Reichweite der Lithium-Ionen-Batterie dürfte der im Vergleich wesentlich höhere Energieinhalt sein (siehe Tab. 1).

Die geringe Kapazität der Dual-Graphit-Batterie lässt sich bei der Betrachtung der Elektroden mit dem Elektronenrastermikroskop erklären (siehe Abb. 9 und 10).

Die Graphitelektrode der Dual-Graphit-Batterie kann den Elektrolyten zum einen schlechter aufnehmen, weil sie weniger porös ist, da sie stark gepresst wurde, und die Graphitpartikel unregelmäßiger verteilt sind. Außerdem ist Graphitelektrode der Dual-Graphit-Batterie brüchiger, da sie kein Bindemittel enthält.

3.6 Fehlerbetrachtung

Normalerweise werden Batterien das erste Mal über drei Tage lang mit kleinen Strömen geladen, damit sich die SEI bildet. Da wir aus Zeitgründen keine drei Formierungszyklen durchgeführt haben, konnte sich die SEI auf unserer Dual-Graphit-Zelle nicht bilden. Da die durch den Elektrolyten solvatisierten Lithiumionen sehr viel größer sind als der Abstand der Graphitschichten, weiten sie beim Intercalieren die Graphitschichten zu sehr auf, der Graphit exfoliiert vermutlich. Außerdem haben wir möglicherweise eine zu hohe Ladespannung beim ersten Ladevorgang unserer Dual-Graphit-Zelle angelegt, wodurch sich möglicherweise der Elektrolyt zersetzt hat. Unsere Vermutung wird durch das Aufblähen der Pouchzelle durch gasförmig gewordenen Elektrolyten gestützt.

Unser Elektrolyt hat sich außerdem teilweise beim Verschweißen im Vakuum verflüchtigt, sodass wir zu wenig Elektrolyt in unsere Zelle hatten. Dieses hat zur Folge, dass nicht mehr genügend Ionen für die Intercalation zur Verfügung stehen.

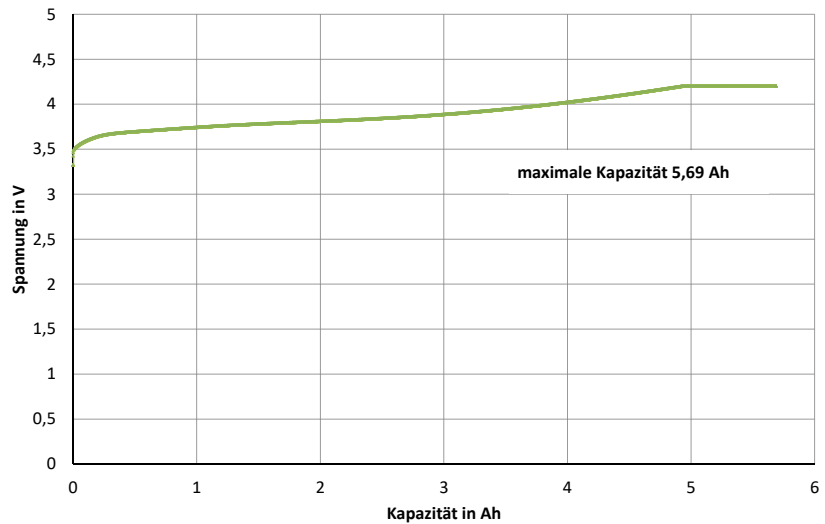


Abb. 7: Ladepkurve der Lithium Ionen Batterie.

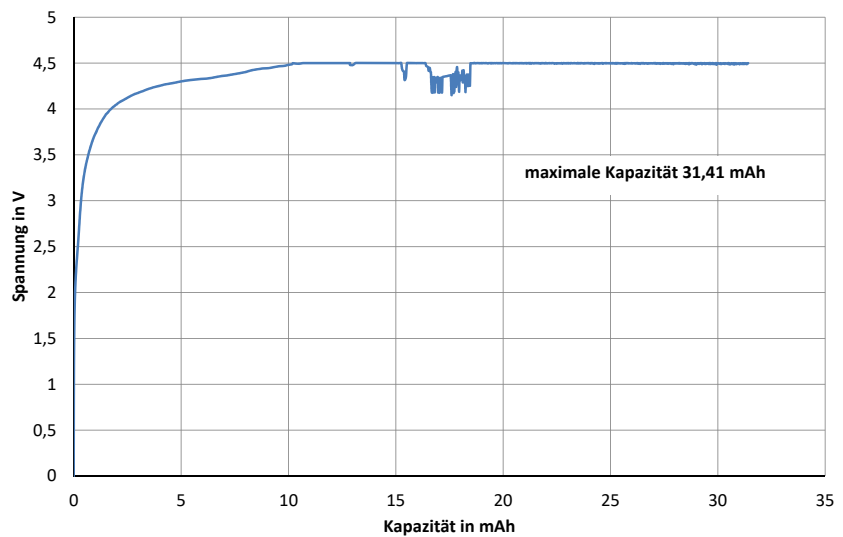


Abb. 8: Ladepkurve der Dual-Graphit Zelle.

	Lithium-Ionen-Batterie	Nickel-Cadmium-Batterie	Dual-Graphit-Zelle
Ausgangsspannung in V	4,2	5,6	3,5
Gewicht in g	139,8	70,3	21,7
Kapazität in Ah	5,7	0,5	0,0314
Spannung in V nach Reichweitentest	4,0	5,2	
Energieinhalt in Wh (berechnet als Produkt aus Ausgangsspannung und Kapazität)	23,9	2,8	0,110
Energie pro Batteriegesamtgewicht in Wh/g	0,171	0,040	0,005
Kapazität pro Batteriegesamtgewicht in Ah/kg	40,7	7,1	1,5

Tab. 1: Tabellarischer Vergleich der verschiedenen Batteriesysteme.

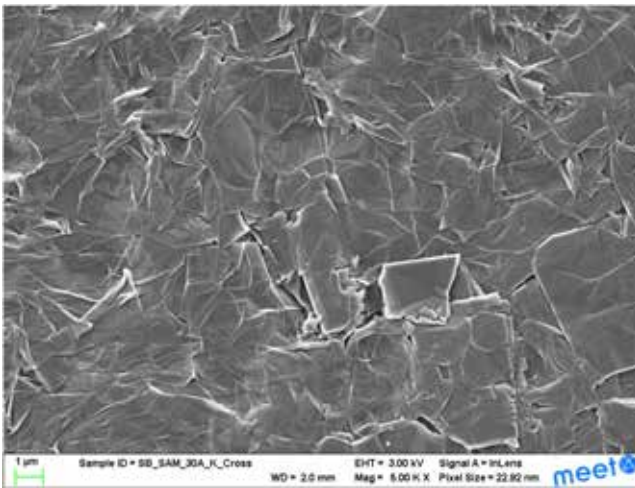


Abb. 9: Graphitelektrode aus der selbstgebauten Dual-Graphit-Batterie.

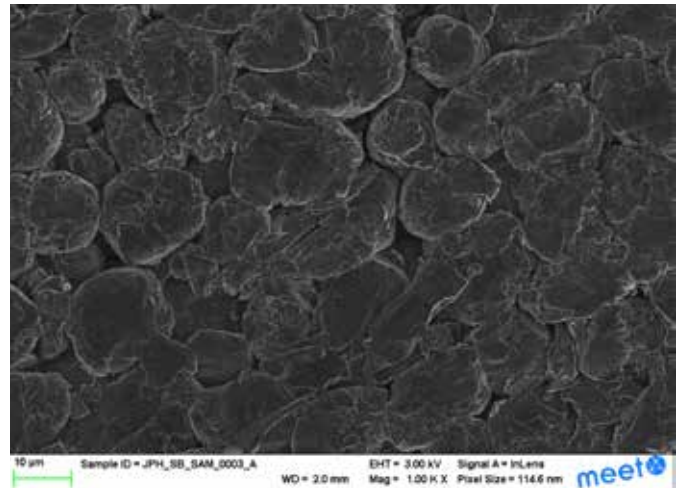


Abb. 10: Graphitelektrode aus einer kommerziellen Lithium Ionen-Batterie.

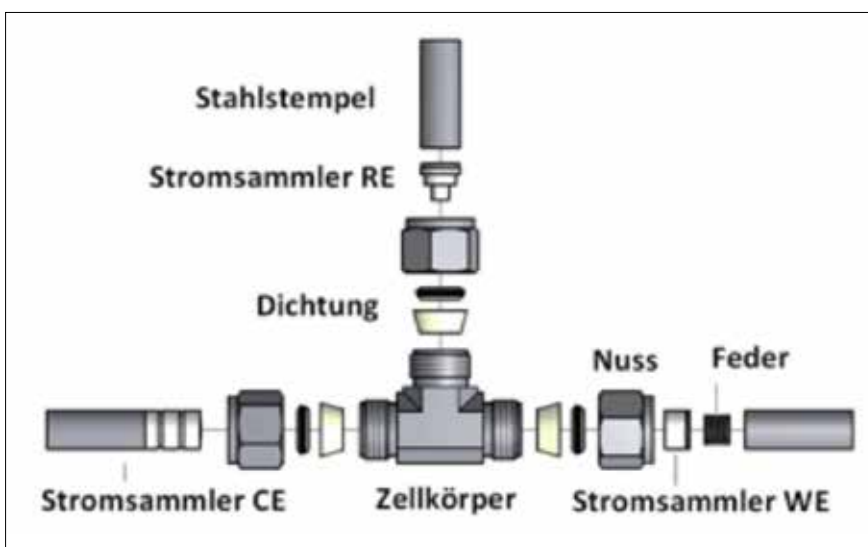


Abb. 11: Schematischer Aufbau einer Swagelokzelle [9].

4 Verbesserung der Dual-Graphit-Zellen

4.1 Bau neuer Zellen

Da die Ergebnisse des ersten Versuchs nicht zufriedenstellend waren, wurden neue Zellen gebaut. Es ging uns darum, die Probleme unserer ersten Dual-Graphit-Zelle zu beheben, um so bessere Ergebnisse erzielen zu können. In dieser Versuchsreihe haben wir elf Pouchzellen und fünf Swagelokzellen, alles Dual-Graphit-Zellen, gebaut.

Die Swagelokzelle ist eine sogenannte T-Zelle, da ihr Aufbau an ein T erinnert (siehe Abb. 11). Das Besondere an dieser Zelle ist, dass sie eine dritte Elektrode besitzt, eine sogenannte Referenzelektrode. Die Swagelokzellen wurden gebaut, um die richtige Ladespannung zu ermitteln. In unseren Zellen bestanden alle Elektroden (Arbeitselektrode (WE), Gegenelektrode (CE) und die Referenzelektrode (RE)) aus Graphit. Der Strom

wird von allen Elektroden mit Hilfe eines Ableiterstempels abgeleitet. Die Zelle wird an allen drei Seiten verschraubt und über eine Feder Druck auf die WE und CE ausgeübt. Die gesamte Zelle wurde vor dem Bau mit sogenannter Mylar Kunststoffolie ausgekleidet, da die Swagelokzelle aus Edelstahl besteht und das Zellgehäuse sonst leiten würde. Die Swagelokzelle ist eine Labortestzelle und ungeeignet für einen Fahrttest, da das Edelstahlgehäuse sehr schwer ist. Der Vorteil einer Swagelokzelle ist, dass nur sehr wenig Material benötigt wird und Druck ausgeübt werden kann. Das Elektrodenmaterial für die Swagelokzellen stammte von den Zuschnittsresten der Pouchzellen. Die Graphitelektroden sind rund, haben einen Durchmesser von 1,2 cm und wiegen 26,27 mg.

Es wurden drei verschiedene Ladespannungen (4,0 V, 4,3 V und 4,5 V) angelegt, um zu sehen, wie sich die Lade-

spannungen auf die Kapazität auswirken. Um die Ladespannung zu erreichen, wurde jeweils ein Strom von 20 mA/g angelegt. mA/g ist die Einheit des spezifischen Stroms, es wurden also 20 mA pro Gramm Elektroden Aktivmasse angelegt. Beim Entladen wurde ein unteres Abschaltpotential von 2 V gewählt. Mit zwei Swagelokzellen wurden Zyklovoltammetrie-Messungen mit Graphit als Referenzelektrode durchgeführt. Zyklovoltammetrie bedeutet, dass bis zu einem bestimmten Potential geladen wird und wieder bis zu einem bestimmten Potential entladen wird. Ein kompletter Lade- und Entladeschritt wird zusammen Zyklus genannt. Bei einer Swagelokzelle wurde das Potential bis 3 V erhöht, bei der anderen bis -3,5 V erniedrigt. Es wurden jeweils drei Zyklen gemessen, um die Ladeschlussspannung zu ermitteln.

Zusätzlich bauten wir elf Pouchzellen, um sie parallel geschaltet als Batterie an das Modellauto anzuschließen. Die Pouchzellen (siehe Abb. 12, Seite 36) sind in ihren Eigenschaften (Materialien, Maße, etc.) identisch mit der Pouchzelle aus dem Kapitel 3, mit der Ausnahme, dass die Pouchfolie nun etwas größer ist. Bei der Fertigung der Zellen wurde allerdings eine grundlegende Änderung vorgenommen. Damit sich der Elektrolyt beim Schweißen unter Vakuum nicht verflüchtigt, wurden elf Elektrolytkissen (siehe Abb. 13, Seite 36) aus Klarsichtfolie mit je 9 ml Elektrolyt angefertigt.

Anstatt des Einspritzens des Elektrolyten in den Separator wurden die Elektrolytkissen intakt in der Pouchzelle eingeschweißt und erst danach in der fertig verschweißten Zelle zerdrückt, sodass



Abb. 12: Die Pouchzelle Lara_01.



Abb. 13: In der Pouchzelle verwendetes Elektrolytkissen, Referenzgröße 2€ Stück.

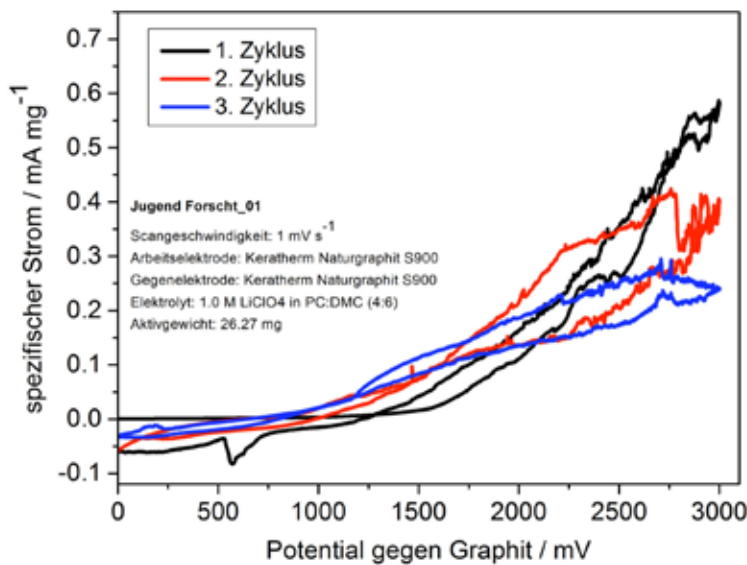


Abb. 14: Zyklovoltammetrie der Swagelokzelle im Bereich zwischen 0 und 3 V (Perchlorationen Intercalation), Referenzelektrode Graphit.

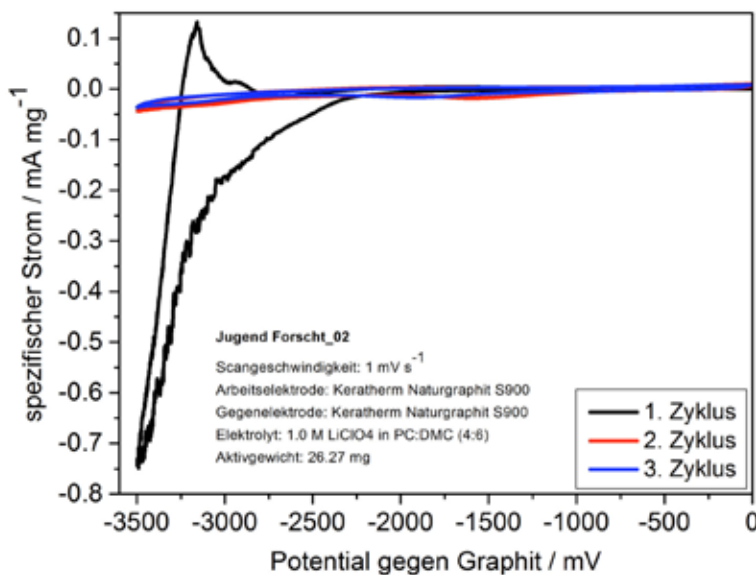


Abb. 15: Zyklovoltammetrie der Swagelokzelle im Bereich zwischen 0 und -3,5 V (Lithiumionen Intercalation), Referenzelektrode Graphit.

sich der Elektrolyt in der Zelle verteilen konnte. Die verwendete Pouchfolie war jedoch eine andere als im Kapitel 3, da sich der Lieferant der Pouchfolie im Batterieforschungszentrum in der Zwischenzeit geändert hatte. Die neue Folie ließ sich wesentlich schlechter schweißen, da sie deutlich dicker war. Daher waren sechs der elf Pouchzellen undicht und damit nicht funktionsfähig.

Nachdem die Zellen gebaut waren, wurden noch einmal verschiedene Ladespannungen von 4,3 V bis 4,7 V getestet. Vorab hatten wir bereits verschiedenen Swagelokzellen mit unterschiedliche Ladespannungen geladen. Dann wurden die funktionierenden Zellen mit einer Spannung von 4,7 V eine Stunde geladen, um zu sehen, ob die Kapazität der parallel geschalteten Zellen nun ausreicht, um das Modellauto zu betreiben. Die gut funktionierenden Zellen wurden wiederholt bei 4,7 V, diesmal aber über 24 h, geladen, um eine höhere Kapazität zu erzielen und sie danach am Modellauto zu testen. Eine der gut funktionierenden Zellen wurde nach dem Test am Modellauto zur Fehleranalyse aufgeschnitten.

4.2 Ergebnisse

Bei der Intercalation von Ionen werden Elektronen frei, dadurch kann ein Strom fließen. Bei Elektrolytzersetzungsreaktionen können auch Elektronen frei werden, es fließt also auch ein Strom. Daher ist bei einer Auftragung des spezifischen Stroms gegen das Potential sowohl die Intercalation, als auch Zersetzungsreaktion messbar. In Abb. 14 und 15 sind die Ergebnisse der Zyklovoltammetriemessungen dargestellt. Die Einlagerung von Ionen sollte einen stufenförmigen, glatten und gleichmäßigen Graphenverlauf aufweisen. In unseren beiden Fällen deuten die Graphen also eher auf eine Elektrolytzersetzung hin. Zusätzlich ist in Abb. 15 zu erkennen, dass nur im ersten Zyklus etwas passiert. In den folgenden Zyklen ist keine Intercalation oder Zersetzungsreaktion mehr zu beobachten.

In den Tabellen 2a und 2b sind die Ergebnisse der Ladespannungstests mit den Swagelokzellen (JHU_JF_01, JHU_JF_03, JHU_04) und der Pouchzellen (JHU_Lara_01, JHU_Lara_02, JHU_Lara_03) aufgetragen. An jede Zelle wurden unterschiedlich hohe La-

Zellentyp: Swagelok	Ladespannung in V	Ladekapazität in mAh	spezifische Ladekapazität in Ah/g	Entladekapazität in mAh	spezifische Entladekapazität in mAh/g	Kapazität in mAh nach 1 h laden bei 4,5V
JHU_JF_01	4	0,05	1,81	0,012	0,45	0,98
JHU_JF_03	4,3	0,22	8,41	0,019	0,71	0,62
JHU_JF_04	4,5	0,87	32,96	0,023	0,89	0,42

Tab. 2a: Zyklisiererdaten der Swagelokzellen.

Zellentyp: Pouch	Ladespannung in V	Ladekapazität in mAh	spezifische Ladekapazität in Ah/g	Entladekapazität in mAh	spezifische Entladekapazität in mAh/g	Kapazität in mAh nach 1 h laden bei 4,7 V
JHU_Lara_01	4,3	0,06	0,037	0,0058	0,0034	3,6
JHU_Lara_02	4,5	0,25	0,15	0,0525	0,031	6,4
JHU_Lara_03	4,7	0,95	0,556	0,3289	0,19	18,2

Tab. 2b: Zyklisiererdaten der Pouchzellen.

despannungen angelegt, um herauszufinden, was die optimale Ladespannung für die Dual-Graphit-Batterie ist. Anhand der Daten des Zyklisierers (Tab. 2) lässt sich erkennen, dass eine höhere Ladespannung eine höhere Kapazität liefert. Dies gilt sowohl für die Swagelokzellen, als auch für die Pouchzellen. Jedoch lässt sich auch klar erkennen, dass die Entladekapazität deutlich geringer als die Ladekapazität ist. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Pouchzellen bei höheren Potentialen geladen als die vorher getesteten Swagelokzellen. Von den fünf dichten Pouchzellen haben erst nur vier, später nur drei während des Zyklisierens zufriedenstellend funktioniert. Die gemessenen Kapazitäten der Pouchzellen sind im ersten Ladezyklus höher als die der Swagelokzellen. Nach einer Stunde Laden ist jedoch ein erheblicher Unterschied erkennbar. Da die Elektroden in den Pouchzellen 1,7 g wogen und die Elektroden in den Swagelokzellen nur 26,27 mg sind, sind die erreichten Kapazitäten der Pouchzellen viel niedriger als theoretisch erwartet. Die Lara_01 wurde aufgeschnitten, um mögliche Fehlerquellen herauszufinden.

Auf den Abb. 16 b) und c) lässt sich erkennen, dass der Graphit auf beiden Seiten exfolierte und Teile der Elektroden noch vollständig trocken sind, sich der



Abb. 16: Fotos von der geöffneten Zelle Lara_01: a) Beide Elektroden und der Separator b) Die Elektroden schwarz (-) und rot (+) c) Die Elektroden und das Elektrolytkissen.

Elektrolyt also nicht gut verteilt hat. Die Exfoliation am Minuspol (ClO_4^- Intercalation) ist stärker zu erkennen als die Exfoliation am Pluspol. Auf Abb. 16 a) lässt sich zudem erkennen, dass der Sepa-

rator wahrscheinlich verrutscht ist. Weil der Separator recht dick ist, kommt es nicht zu einem Kurzschluss, es hat aber zur Folge, dass die Stelle ohne Separator nicht mit Elektrolyt versorgt ist, da der

Separator den Elektrolyten aufnimmt. Der erste Autotest mit den fünf über eine Stunde bei 4,7 V geladenen Pouchzellen fiel negativ aus, die Zellen waren parallel geschaltet nicht in der Lage, das Auto anzufahren zu lassen. Beim zweiten Autotest wurden die drei gut funktionierenden Batterien über 24 h lang bei 4,7 V geladen. Das Auto fuhr ebenfalls nicht an, jedoch leuchteten immerhin die Lampen des Autos.

4.3 Fehlerbetrachtung

Die dickere Pouchfolie scheint wenig geeignet zum Schweißen mit einem graphitischen Ableiter dazwischen. Durch das Elektrolytkissen konnte das Verflüchtigen des Elektrolyten beim Vakuumverschweißen verhindert werden, allerdings verteilt sich der Elektrolyt möglicherweise nach dem Verschweißen schlechter. Zusätzlich ist die Pouchzelle etwas größer, damit das Kissen auch noch Platz findet.

Das Elektrodenmaterial scheint doch eher ungeeignet zu sein, da es schnell exfoliiert; ein sogenannter Binder könnte dies zum Teil verhindern. Allerdings sollte der Binder umweltverträglich sein, da die Dual-Graphit-Batterie sonst nicht mehr sicher und umweltverträglich wäre.

Gleiches gilt für den Elektrolyten: Dieser bildet möglicherweise keine effektiven Schutzschichten; die Eigenschaft ließe sich durch einen anderen Elektrolyten oder ein anderes Leitsalz, die aber auch dem Anspruch der Sicherheit und Umweltverträglichkeit genügen sollten, ändern. Bei einem Vergleich von Swagelokzellen und Pouchzellen fällt auf, dass die Swagelokzellen für ihre geringe Aktivmasse im Vergleich relativ hohe Kapazitäten zeigen. Das liegt wahrscheinlich an dem relativ hohen Druck, der in der Swagelokzelle herrscht. Wenn es gelingt in einer Pouchzelle ebenso Druck auf die Aktivmasse auszuüben, ließe sich damit die Kapazität erheblich steigern.

5 Materialscreening für Binder und Elektrolyte

In einer dritten Versuchsreihe wählten wir in einem umfangreichen Materialscreening verschiedene umweltfreundliche Binder und Elektrolyte aus und testeten diese. Dabei arbeiteten wir ausschließlich mit Swagelokzellen, da diese weniger Material verbrauchen, gut mit

vorhandenen Messmethoden kompatibel und die Ergebnisse besser vergleichbar sind.

5.1 Vorauswahl verschiedener Materialien

5.1.1 Binder

Ein sogenannter Binder im Elektrodenmaterial, in unserem Fall Graphit, hat die Aufgabe die Partikel zu binden und dazu beizutragen, dass eine effektive SEI gebildet wird. Der Binder übernimmt auch die Aufgabe, das Aktivmaterial auf einem Stromsammelmateriale (Kupfer oder Aluminium) haften zu lassen. Mit dem Einsatz eines Binders muss das Elektrodenmaterial weniger stark gepresst werden, wodurch eine höhere Porosität erreicht werden kann. Dadurch wächst die Oberfläche des Aktivmaterials und durch die größere Angriffsfläche für den Elektrolyten auch die spezifische Kapazität. Der Einsatz eines Binders könnte also helfen, die Hauptprobleme unserer Dual-Graphit-Zelle wie die Exfoliation des Elektrodenmaterials durch den Aufbau einer geeigneten SEI zu lösen. Dabei muss keineswegs auf die Umweltfreundlichkeit und Sicherheit verzichtet werden. Wir haben folgende umweltfreundliche Binder an unserer Dual-Graphit-Batterie getestet, da sie sich bereits bei anderen Batterietypen als geeignet herausgestellt haben.

Na-Carboxymethylzellulose: Na-Carboxymethylzellulose (CMC) lässt sich durch das Einfügen von Carboxymethylgruppen in Zellulose herstellen, es ist so unbedenklich, dass es sogar in Lebensmitteln verwendet wird. CMC ist wasserlöslich, kann also wässrig produziert werden, was die gesamte Produktion vereinfacht. Dazu ist CMC günstig und kann, da es fluorfrei ist, sehr gut recycelt werden. Beim Testen an einer LiFePO_4 Elektrode wurden viele Vorteile festgestellt. Zum einen sind die Elektrodenpartikel mit CMC gleichmäßiger und kompakter verteilt, als in einer Vergleichselektrode mit dem herkömmlich in einer Lithium-Ionen-Batterie verwendeten Polyvinylidendifluorid (PVdF). Außerdem stellte sich die Elektrode mit CMC als deutlich zyklenstabiler als die Elektrode mit PVdF heraus. [10]

Gelatine: Die Eignung von Gelatine wurde bisher an Graphitelektroden noch nicht hinreichend untersucht, die Ergeb-

nisse bei einer Schwefeloxiddkathode sind aber vielversprechend. Verwendet wurde Gelatine des Typs B aus Schweinehaut. Vorteilhaft ist, dass sich Gelatine in Wasser lösen lässt, was den Arbeitsaufwand erleichtert. Außerdem ist ihre Sicherheit und Umweltfreundlichkeit sehr gut, da Gelatine sogar in Lebensmitteln verwendet wird. Die Untersuchungen an einer Schwefeloxiddkathode zeigen, dass Gelatine die Kapazität der Batterie steigert, da es gute Dispersions- und Adhäsionsfähigkeiten besitzt. [11]

Alginate: Alginate sind die Salze der Algininsäure, die sich beispielsweise aus der Braunalge herstellen lassen. Sie haben den Vorteil, dass sie in größeren Mengen vorhanden sind, umweltfreundlich und unbedenklich sind, da sie häufig auch in Kosmetik oder Nahrungsergänzungsmitteln eingesetzt werden. Als Binder in Lithium-Ionen-Batterien wurde bisher Alg-Na sowohl im Zusammenspiel mit Ionischen Flüssigkeiten als auch mit organischen Carbonaten untersucht. In der Verwendung in Batterien haben Alginate den Vorteil, dass sie wasserlöslich sind, also wässrig aufgetragen werden können. In Ionischen Flüssigkeiten scheint Alg-Na gut geeignet zu sein, da es die Leistungsfähigkeit verbessert und deutlich zyklenstabiler ist als klassische Binder wie beispielsweise PVdF. Auch in organischen Carbonaten scheint Alg-Na geeignet zu sein, wenn auch weniger gut als in Ionischen Flüssigkeiten. [12]

5.1.2 Elektrolyte

Da der Elektrolyt einen wichtigen Bestandteil der Zelle darstellt und die Ergebnisse mit dem verwendeten Elektrolyten nicht zufriedenstellend waren, haben wir uns entschieden, nach Alternativen zu suchen. Hierfür sind zwei Komponenten gesondert zu betrachten: Ein geeignetes Leitsalz und ein dazu passendes Lösungsmittel. Dabei sind verschiedene Elektrolytzusammensetzungen mit verschiedenen Leitsalzen möglich.

Als Leitsalz in Lithium-Ionen-Batterien wird weit verbreitet LiPF_6 verwendet. Das Lithiumion ist ein äußerst geeignetes kleines Kation, welches aber auch durch andere Kationen wie z.B. Natriumionen oder Magnesiumionen ersetzbar wäre. Das PF_6^- Anion eignet sich besonders aufgrund seiner geringen Größe und der Eigenschaft eine gute SEI zu bilden.

Zellenbezeichnung	Leitsalz	Lösungsmittel	Elektrode
JHU_BW_01	LiClO ₄	PC:DMC (2:3)	KS6L mit CMC
JHU_BW_02	LiClO ₄	EC:DMC (1:1)	KS6L mit CMC
JHU_BW_03	LiBOB	EC:DMC (1:1)	KS6L mit CMC
JHU_BW_04	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	KS6L mit CMC
JHU_BW_05	LiClO ₄	PC:DMC (2:3)	KS6L mit CMC
JHU_BW_06	LiClO ₄	EC:DMC (1:1)	KS6L mit CMC
JHU_BW_07	LiBOB	EC:DMC (1:1)	KS6L mit CMC
JHU_BW_08	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	KS6L mit CMC
JHU_BW_09	LiClO ₄	PC:DMC (2:3)	KS6L mit CMC
JHU_BW_10	LiClO ₄	EC:DMC (1:1)	KS6L mit CMC
JHU_BW_11	LiBOB	EC:DMC (1:1)	KS6L mit CMC
JHU_BW_12	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	KS6L mit CMC
JHU_BW_13	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	Naturgraphit
JHU_BW_14	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	KS6L mit Gelantine
JHU_BW_15	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	KS6L mit Alginat
JHU_BW_16	LiTFSI	Py _{r14} TFSI + 2 % ES	KS6L Binderfrei

Tab. 3: Überblick über die Zellen.

Doch das PF₆⁻ Anion entspricht nicht unseren Anforderungen an Umweltverträglichkeit, da es sich um eine fluoridierte Verbindung handelt, aus der Fluorwasserstoff (Flusssäure) entstehen kann.

Das Lithiumbis(trifluorsulfonyl)imid (LiTFSI) ist ein weiteres mögliches Leitsalz, das in der Dual-Ionen-Zelle bereits erforscht wurde und sich sehr gut aufgrund seiner thermischen Stabilität und seiner Löslichkeit eignet [13]. Doch auch dieses Leitsalz ist nicht fluorfrei.

Eine umweltverträgliche Alternative stellt LiClO₄ dar, welches fluorfrei ist und sich durch eine hohe Mobilität der Ionen auszeichnet, jedoch eine geringere thermische Stabilität besitzt als andere Leitsalze. Lithiumbis(oxalato)borat (LiBOB) wäre ein weiteres fluorfreies Leitsalz, welches in der Dual-Graphit-Batterie bisher nicht getestet wurde. Es ist fluorfrei, aber

sehr groß. Eine Vorhersage der Eignung ist daher eher schwierig. [14]

Auch für das Lösungsmittel des Elektrolyten gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. Ethylencarbonat (EC), so hat sich nach weiterer Recherche ergeben, soll besonders geeignet für die Ausbildung der SEI sein. [7] Auch der relativ hohe Siedepunkt im Vergleich zu anderen organischen Carbonaten bietet Vorteile, besonders im Hinblick auf die Sicherheit. Doch EC besitzt eine hohe Viskosität, wodurch die Leitfähigkeit eingeschränkt ist. Deshalb ist es notwendig, ein weiteres Lösungsmittel zu verwenden, welches eine geringere Viskosität besitzt. Dimethylcarbonat (DMC) aber auch Diethylcarbonat (DEC) sind Beispiele hierfür. So ist auch das Mischverhältnis beider organischer Lösungsmittel entscheidend für die Funktionalität des gesamten Lösungsmittels. Eine interessante Alternati-

ve zu organischen Carbonaten stellen Ionische Flüssigkeiten dar. Sie zeichnen sich durch eine hohe thermische und elektrochemische Stabilität aus. Weiterhin sind sie nicht entzündlich, also im Hinblick auf Sicherheit gut geeignet. Ionische Flüssigkeiten bieten den Vorteil, dass auch eine Anwendung ohne Leitsalz möglich wäre, da es sich um flüssige Salze handelt und auch andere Kationen als Lithium bekannt sind, die sich reversibel intercalieren lassen. [15] Ionische Flüssigkeiten eignen sich grundsätzlich für die Intercalation in Dual-Graphit-Batterien. [13]

5.2 Bau neuer Zellen

Schon in der zweiten Versuchsreihe hat sich der Naturgraphit durch seine rasche Exfoliation als ungeeignet herausgestellt. Für die Elektroden nutzten wir daher KS6L Graphit, der durch seinen flakeförmigen Aufbau eine größere Oberfläche

besitzt und so bessere Intercalationsmöglichkeiten bietet.

Um gleichzeitig die vorher ausgewählten Binder vergleichen zu können, haben wir uns dazu entschieden, mit Slurrys zu arbeiten. Ein Slurry besteht aus den gewünschten Mengen an Graphit und Binder in Pulverform und Wasser, das zuvor mehrere Stunden mit Hilfe eines Rührfisches und eines Magnetrührers durchgerührt wurde. Ein solches Slurry wird dann in einen sogenannten Coater gegeben, welcher die Ableiterelektroden (Aluminium- und dendritische Kupferfolie) mit einer 200 µm dicken Schicht gleichmäßig beschichtet. Die beschichteten Ableiterelektroden wurden anschließend im Trockenschrank bei 70 °C getrocknet, mit einer Größe von 12 mm als Elektroden für die Swagelokzellen ausgestanzt und zuletzt über einen Zeitraum von drei Tagen von ihrer Restfeuchte befreit. So stellten wir zahlreiche Elektroden mit jeweils 5 % CMC, 2 % Gelatine oder 2,5 % Alginat her. Als Vergleich dienten zusätzlich Elektroden mit binderfreiem Slurry sowie aus Naturgraphit. Aufgrund der Kapazitäten des MEET Batterieforschungszentrums war es uns möglich, 16 Zellen zu bauen, welche wir an den Zyklisierern auf ihre Funktionalität und Kapazität überprüfen konnten. Zuerst wurden an den Zellen JHU_BW_01 bis JHU_BW_08 in drei Zyklen Messungen vorgenommen. Durch diese sogenannte Zyklovoltmetrie lässt sich die optimale Ladespannung ermitteln, die wir bei unseren folgenden Messungen verwendeten. In Tests mit den Zellen JHU_BW_09 bis JHU_BW_12 wurden die verschiedenen Elektrolyte mit möglichen Mischungsverhältnissen der Lösungsmittel und jeweils unterschiedlichen Leitsalzen getestet. Messungen mit verschiedenen Graphiten und Bindern erfolgten mit den Zellen JHU_BW_12 bis JHU_BW_16. Um zu viele Variablen zu vermeiden und die Vergleichbarkeit zu sichern, veränderten wir jeweils nur Elektrodenmaterial oder Elektrolyt, nie beides gleichzeitig. Die verwendeten Materialien in den Zellen lassen sich im Einzelnen aus Tab. 3 (Seite 39) entnehmen.

5.3 Ergebnisse

Aus Abb. 17 lässt sich erkennen, dass alle Elektroden mit Binder höhere Kapazitäten zeigen als die Elektroden ohne Binder. Alle getesteten Binder scheinen

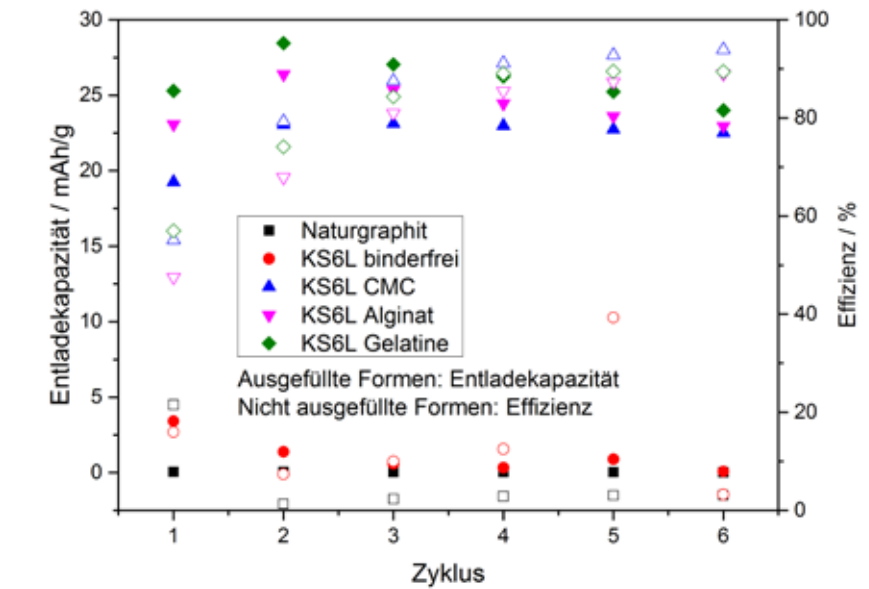


Abb. 17: Spezifische Entladekapazität und Effizienz der Elektroden (Binder) im Vergleich.

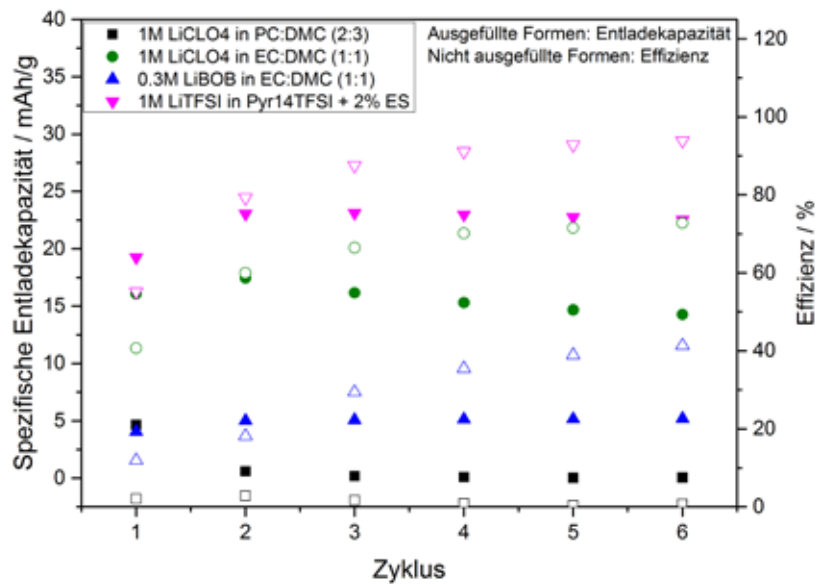


Abb. 18: Spezifische Entladekapazität und Effizienz der Elektrolyte (Leitsalze und Lösungsmittel) im Vergleich.

also geeignet für den Einsatz in der Dual-Graphit-Batterie. Weitere Untersuchungen in Halbzellen sind nötig, um die Binder untereinander genauer zu vergleichen.

Abb. 18 zeigt, dass die Effizienz der organischen Elektrolyte für eine lange Lebensdauer der Batterie zu niedrig ist. Die Ionische Flüssigkeit ist zwar der elektrochemisch stabilste und geeignetste Elektrolyt im Test, allerdings ist sie recht teuer und als flourierte Verbindung nicht umweltfreundlich. Ebenfalls recht gut schneidet Lithiumperchlorat mit den Lösungsmitteln Ethylen- und Dimethylcarbonat (Verhältnis 1:1) ab. Dieser Elektrolyt ist flourfrei und bietet eine

hohe Mobilität der Ionen, ist jedoch im Vergleich thermisch weniger stabil.

5.4 Fehlerbetrachtung

Um die Elektrolyte und Binder auf den langfristigen Einsatz der Batterie zu testen, stehen weitere Langzeittests an. Außerdem handelt es sich bei dieser Versuchsreihe um jeweils eine baugleiche Batterie, die getestet wurde. Da die Fehlerquote dieses Verfahrens recht hoch ist, müssen weitere Experimente mit gleichem Vorgehen durchgeführt werden, um Fehlerquellen auszuschließen und die Wiederholbarkeit zu sichern.

Nicht nur der Druck, sondern auch der pH-Wert sollte in weiteren Versuchs-

reihen berücksichtigt werden. Binder gehen in unterschiedlichen Milieus unterschiedliche Bindungen ein. Mit Tests zu verschiedenen pH-Werten ließe sich der optimale Wert für den Einsatz in der Batterie finden. Unter unseren Elektrolyten im Screening hatten wir diesmal nur einen Vertreter der Ionischen Flüssigkeiten, um die Übersichtlichkeit nicht zu verlieren. Pyr14 TFSI schnitt dabei allerdings sofort so erfolgreich ab, dass es interessant wäre, auch andere Ionische Flüssigkeiten auf ihren Einsatz in der Dual-Graphit-Batterie zu testen.

6 Fazit

Ziel unserer Arbeit blieb über den gesamten Zeitraum der Forschung, eine möglichst leistungsstarke Batterie mit fast ausschließlich unbedenklichen Materialien herzustellen. Dies ist uns gelungen: In unseren Experimenten hat sich gezeigt, dass umweltfreundliche Materialien grundsätzlich verwendet werden können. Jedoch wurde besonders beim Materialscreening eine Diskrepanz zwischen Umweltverträglichkeit und Funktionalität immer deutlicher; die Leistung unserer Dual-Graphit-Batterien blieb zu gering. Fluorhaltige Materialien wie Ionische

Flüssigkeiten stellen zwar eine mögliche und sehr funktionale Alternative dar, weichen aber von unserer Grundidee der umweltfreundlichen Batterie stark ab.

Für einen flächendeckenden Einsatz der Dual-Graphit-Batterie in der Elektromobilität ist die spezifische Kapazität derzeit noch zu niedrig, das Gewicht der Batterie für den Einsatz im Elektroauto daher schlichtweg zu hoch. Doch schon in naher Zukunft böte sich der Einsatz für kleinere oder stationäre Anwendungen, beispielsweise auf Windkraftanlagen als elektrische Speicher, mit den vorhandenen Bindern und Elektrolyten durchaus an. Um unsere Ziele zu erreichen, besteht noch ein hoher Bedarf an weiterer intensiver Forschung, die jedoch sehr lohnenswert ist. Unsere Versuche haben gezeigt, dass die Dual-Graphit-Batterie, insbesondere durch ihre geringen Kosten und hohe Umweltverträglichkeit, langfristig im Vergleich zu aktuellen Technologien wie dem Lithium-Ionen-Akkumulator großes Potential besitzt.

Danksagung

Wir danken dem WWF Deutschland und der Robert Bosch Stiftung,

dem Träger und den Unterstützern der Schülerakademie 2°Campus, für die Initiative der Zusammenarbeit. Insbesondere danken wir Birgit Eichmann, die einen Großteil der Organisation der Forschungsphase übernommen hat. Zusätzlich möchten wir der WWU Münster und speziell Prof. Dr. Cornelia Denz und dem MexLab Physik danken, die den Kontakt zum MEET Batterieforschungszentrum ermöglicht haben und von universitärer Seite den 2°Campus unterstützen. Wir danken außerdem dem MEET Batterieforschungszentrum und speziell Prof. Dr. Martin Winter für die Ermöglichung der Laborarbeit, der Labornutzung und der Bereitstellung von Materialien. Speziell danken möchten wir Jessica Hüsker, unserer Betreuerin, für Literaturtipps zur Elektrochemie, die Unterstützung bei theoretischen Fragen, das Bedienen des Batteriezyklisierers und die Beaufsichtigung der Laborarbeit. Ferner danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projektes „INSIDER“ (Fördernummer: 03EK3031A), welches die Forschung an der Dual-Ionen-Technologie ermöglicht und uns einige Materialien zur Verfügung gestellt hat.

Quellenverzeichnis

- [1] IPCC. 5. Sachstandsbericht. Kopenhagen : s.n., 2014.
- [2] Weltklimabericht 2014. [Online] [Zitat vom: 14. 01 2015.] <http://www.ipcc14.de/kommentare/35-glossar/z/99-zwei-grad-ziel>.
- [3] Ziesing, Dr. Hans-Joachim. Prognos AG. 2009. S. 4 ff.
- [4] T. Placke, O. Fromm, S.F. Lux, P. Bieker, S. Rothermel, H.-W. Meyer. Study of the Electrochemical Behavior of Dual-Graphite-Cells using Ionic Liquide-based Electrolytes. The Electrochemical Society. 2014.
- [5] M. Hasselmann, M. Oetken. Versuche zu Lithium - Ionen - Akkus. Chemie in unserer Zeit. 2014, Bd. 48, S. 102-113.
- [6] Rahimzei, Sann, Vogel. Compendium Li-Ionen-Batterien. 2015.
- [7] M. Hasselmann, M. Oetken. Supporting Information zu Versuche zu Lithium - Ionen - Akkus. Chemie in unserer Zeit. 2014.
- [8] WWF. Ergebnisse Gruppe Mobilität des 2°Campus 2013. Berlin : s.n., 2013.
- [9] Fromm, Olga. Diplomarbeit, Anionen Interkalation in graphitische Kohlenstoffe. Uni Münster : s.n., 2012.
- [10] S.F. Lux, F. Schappacher, A. Balducci, S. Passinerini, M. Winter. Low Cost Environmentally Binders for Lithium-Ion Batteries. Journal of the Electrochemical Society. 22. Januar 2010.
- [11] Qinqin Wang, Weikun Wang, Yaqin Huang, Feng Wang, Hao Zhang, Zhongbao Yu, Anbang Wang, Keguo Yuan. Improve Rate Capability of the Sulfur Cathode Using a Gelatin Binder. Journal of the Electrochemical Society. 2011, 158.
- [12] Kazunari Soeda, Yukiko Matsui, Masaki Yamagata, Masashi Ishikawa. Application of Alginate Binders to Graphite Electrodes and Characterization of their Lithium-ion batteries. The Electrochemical Society. 2013.
- [13] S. Rothermel, P. Meister, O. Fromm, J. Huesker, M.-W. Meyer, M. Winter, T. Placke. Study of the Electrochemical Behavior of Dual-Graphite Cells using Ionic liquid-based Electrolytes. The Electrochemical Society. 2014.
- [14] Vorlesung zum Modul "Elektrochemische Energiespeicherung und Umwandlung". Winter, Martin. 2015.
- [15] Electrochemical intercalation/deintercalation of cations into/from graphite electrode in ionic liquid. Kotaro Ono, Kohei Miyazaki, Tomokazu Fukutsuka, Takeshi Abe. s.l. : The Electrochemical Society, 2013. Abstract #278 224th ECS Meeting.