

# Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer

Ulrich Schadeck

Entwicklung glasbasierter Separatoren  
für Lithium-Ionen-Batterien

Band 15



UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

# Entwicklung glasbasierter Separatoren für Lithium-Ionen-Batterien

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Ulrich Schadeck, M.Sc.

aus  
Nabburg

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos
Zweitgutachterin:	Prof. Dr.-Ing. Christina Roth
Tag der mündlichen Prüfung:	05. Dezember 2019

Keylab Glastechnologie  
Lehrstuhl Keramische Werkstoffe  
Lehrstuhl für Funktionsmaterialien

Universität Bayreuth

2019



Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen

Band 15

**Ulrich Schadeck**

**Entwicklung glasbasierter Separatoren  
für Lithium-Ionen-Batterien**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7225-9

ISSN 1866-5047

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort der Herausgeber

Lithium-Ionen-Batterien gehören zu den vielversprechendsten elektrochemischen Energiespeichern. Sie besitzen hohe Energiedichten, einigermaßen hohe Leistungsdichten und sind vor allem langzeitstabil und kommerziell verfügbar. Derzeit wird vor allem an neuen Anoden- und Kathodenmaterialien geforscht. Der Separator, der bei Nichtfestelektrolytbatterien benötigt wird, damit die Anoden- und Kathodenseiten sich nicht berühren, ist kaum Gegenstand der Forschung.

Kommerzielle Separatoren bestehen aus porösen Polymerfolien. Das bedeutet, sie besitzen eine geringe Temperaturstabilität und sie schwinden bei erhöhten Temperaturen. Abhilfe schaffen mit anorganischen Partikeln beschichtete Separatoren, sogenannte Komposit-Separatoren, die vielfach kommerziell eingesetzt werden und die den derzeitigen Stand der Technik darstellen. Erhöht sich aufgrund eines unvorhersehbaren Ereignisses die Zelltemperatur über das zulässige Maß hinaus, so schmilzt die innenliegende Polymervliesmatrix, jedoch bleiben die anorganischen Partikel intakt. Damit wird die Separatorfunktion beibehalten. Nachteilig ist aber auch hier die maximale Einsatztemperatur im Bereich von etwa 200 bis 250 °C.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Es werden glasbasierte Separatoren entwickelt, die in Flüssigelektrolyt-Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt werden können. Dabei werden einerseits selbsttragende Glas-Komposit-Separatoren untersucht, wobei Glasflakes in ein Glasfaser-Basisvlies integriert werden. Andererseits sind Komposite aus Glasflakes und Batterieelektroden, die über einen Rakel-Prozess mit Hilfe einer wässrigen Alginat-Binder-Glasflakes-Suspension hergestellt werden, Gegenstand näherer Betrachtungen.

Neben der naturgemäß gegebenen Hochtemperaturstabilität wird auch eine elektrochemische Aktivität der glasbasierten Separatoren festgestellt, die die Batterie-Performance erhöhen kann.

Bayreuth im Dezember 2019

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer



# Danksagung

*Herr Schadeck, es muss Ihnen klar sein, dass Sie während Ihrer Promotion immer einsamer und frustrierter werden.*

Prof. Dr. Monika Willert-Porada<sup>†</sup>

Auf diese Worte blicke ich mit einem Lächeln zurück, denn das sind jene erste Worte, die Frau Prof. Dr. Monika Willert-Porada in meinem Antrittsgespräch an mich richtete. Das sind Worte, die ich im Kern durchaus unterschreiben kann, jedoch gelten sie zumindest für meine Promotion nur bis zu einem gewissen Zeitpunkt. Einige Misserfolge, beeinflusst von allgemeinem Unwissen haben etwa die erste Hälfte meiner Schaffenszeit geprägt. Je tiefer ich jedoch in die verschiedenen thematischen Schwerpunkte meiner Arbeit eindringen konnte, desto mehr änderte sich die Stimmung in Freude, Wissensdurst und dem unbedingten Willen, diesen Lebensabschnitt mit einem Erfolg zu krönen.

Diesen Umschwung in meinem Denken und Handeln hätte ich jedoch ohne einige wichtige Personen, die es hier zu nennen gilt, nicht geschafft.

Als erstes möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos danken, der sich sofort für die Übernahme meiner Betreuung nach dem plötzlichen Tod meiner Dokormutter Frau Prof. Willert-Porada bereitstellte. Ich empfand es als immer sehr zielführend mit ihm zu diskutieren und ich konnte durch seine Anregungen viele Aspekte dieser Arbeit kritisch hinterfragen und mit einem anderen Auge sehen. Die zahlreichen Gespräche, seine schnelle Korrespondenz und die erhaltenen Tipps, die er immer in einer unterhaltsamen Art und Weise weitergab, haben mir sehr geholfen das Puzzle der vielen Aspekte meiner Arbeit gedanklich zusammenzusetzen. Seine Betreuung war definitiv ein Gewinn für meine Arbeit. Vielen Dank!

Natürlich gilt ein großer Dank Frau Prof. Dr. Willert-Porada, die es mir ermöglichte, an ihrem Lehrstuhl mit einer äußerst interessanten Themenstellung promovieren zu können. Es war grundsätzlich sie, die mir oftmals den berühmten Tritt in den Allerwertesten verpasst hat und maßgeblich zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen hat – vor allem im ersten Jahr meiner Promotion. Vieles, was sie vielleicht auch nur in einem Nebensatz erwähnt hatte, wurde irgendwann doch noch sehr wichtig beim Bearbeiten meines Themas und sorgte im Nachhinein oft für den sogenannten „Aha-Effekt“.



Frau Prof. Dr.-Ing. Christina Roth möchte ich für die hilfreichen Gespräche und Tipps danken, die mir die schlussendliche Fertigstellung der Arbeit erleichtert haben. Zudem danke ich Ihr recht herzlich für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Gerdes gebührt ein riesiges Dankeschön, da er es war, der mir die Freiheit in der Gestaltung meiner Arbeit gegeben und mich stets in meinem Tun unterstützt hat. Sein großes Interesse an meiner Arbeit und die zahlreichen produktiven Diskussionen haben sehr geholfen und mich in meinem Schaffen bestärkt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael A. Danzer danke ich für die produktiven Diskussionen über die Impedanzspektroskopie und die DRT, was mir bei der Fertigstellung meiner Arbeit sehr geholfen hat.

Vielen Dank an meine Kollegen, allen voran an die Batteriegruppe – besonders Michael Fink, Tobias Michlik, Olga Isakin, Patrick Heimerding, Manuela Schmid, Karina Mees und Peter Pontiller-Schymura. Neben den ergebnisreichen Diskussionen blieb der Spaß im Büro nicht auf der Strecke und es hat stets Freude gemacht mit Euch zusammenzuarbeiten. Danke an Markus Hahn für die Einführung in die DRT-Methode und die Diskussion zahlreicher Messergebnisse. Danke auch an Dominik Hanft fürs Korrekturlesen und die vielen Diskussionen über Batteriethemata bei einem Tässchen Kaffee.

Weiterhin möchte ich mich bei allen aus der Glasgruppe bedanken, vor allem Ali Saberi und Kanat Kyrgyzbaev, die mich in die Thematik der Glastechnik eingeführt haben. Danke an das TAZ-Team für die Herstellung von unzähligen Kilos Glasflakes für meine Versuche. Vielen Dank auch an Andreas Rosin für die vielen Diskussionen und für Dein immer offenes Ohr für Problemstellungen aller Art. Daniel Leykam, vielen Dank für den nicht endenden Kaffeevorrat im Büro und unsere täglichen Gespräche über unsere Kinder und Leidsbekundungen, wer wohl die vergangene Nacht weniger Schlaf hatte. Danke an Sebastian Lehmann und Lukas Zielbauer für die XPS-Messungen. Ingrid Otto, Philipp Ponfick und Peter Kostolansky möchte ich für die technische Unterstützung danken. Danke, Kerstin Söllner für Deine Geduld mit mir und Deine Hilfe bei alltäglichen organisatorischen Dingen. Vielen Dank auch an alle weiteren Kollegen für die tolle und angenehme Zusammenarbeit.

An das Graduiertenkolleg der Technologieallianz Oberfranken und an das Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technik im Förderprogramm „Neue Werkstoffe in Bayern“ geht mein herzlicher Dank für die großzügige Finanzierung meiner Arbeit.

Vielen Dank an meine Eltern, meine Schwester, meinen Schwager und Korrekturleser und meinen Freunden für die Hilfe und die ständige Motivation, die mir beim Durchhalten sehr geholfen hat.

Zu guter Letzt gilt der allergrößte Dank meiner kleinen Familie. Liebe Carina, es ist nicht selbstverständlich, dass man diese grenzenlose Unterstützung und dieses unbändige Verständnis für meine zahlreichen nervlichen Tiefpunkte, vor allem am Ende dieser Arbeit erhält – noch dazu, wenn man mit unseren wundervollen Zwillingen, unserer Marlene und unserem Jonathan, sowieso nicht gerade wenig um die Ohren hat. Ohne Deine Unterstützung hätte ich diese Arbeit wohl nicht zu Ende gebracht. Vielen, vielen Dank!

# Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Entwicklung eines glasbasierten Separators für Lithium-Ionen-Batterien beschrieben, der im Vergleich zu kommerziellen polymerbasierten Separatoren wesentlich temperaturstabiler ist. Zudem ist dieser Separator aufgrund einer Wechselwirkung mit dem Batterie-Elektrolytleitsalz eine chemisch-aktive Zell-Komponente und trägt hierdurch zur Verbesserung der elektrochemischen Eigenschaften der Gesamtzelle bei. Der Separator besteht aus Glas, wobei hauptsächlich Mikrometer-Glasflakes eingesetzt werden. Es wurden verschiedene Glas-Morphologien und Glas-Materialzusammensetzungen auf deren elektrochemische Eigenschaften in organischen Batterie-Elektrolyten sowie Batterie-Experimentalzellen in einer Vollzell-Konfiguration untersucht und optimiert. Zur praktischen Verwendbarkeit der Glasflakes als Separatoren wurden diese entweder in ein Glasfaser-Basisvlies integriert, welches als Trägermaterial fungiert, oder direkt auf eine Batterie-Elektrode beschichtet. Somit standen selbsttragende Separatoren und Separatoren/Batterie-Elektroden-Komposite zur Charakterisierung zur Verfügung.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit war die elektrochemische Charakterisierung der gläsernen Separatoren, wobei unterschiedliche galvanostatische Untersuchungen mit verschiedenen Last-Profilen und deren Einfluss auf die Zell-Alterung, vorwiegend im System Graphit|Lithium-Eisenphosphat, untersucht wurden. Zudem wurde eine Kombination der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) und der Analyse der verteilten Relaxationszeitkonstanten (DRT) verwendet, da anhand dieser Methoden spezifische Alterungsprozesse beurteilt werden können und diese zumindest für die Verwendung glasbasierter Separatoren noch weitestgehend unbekannt sind. Die Wechselwirkung von Separatoren-Glas/Batterie-Elektrolytleitsalz bzw. Separatoren-Glas/Elektroden-Aktivmaterialien erfolgte neben der elektrochemischen Beurteilung mittels begleitender analytischer Charakterisierungen. Hierzu wurden definiert gealterte Zell-Komponenten mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) sowie mit Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) im Rahmen von *Post-mortem*-Analysen untersucht.

Neben der Ermittlung elektrochemischer Charakteristika wurden auch einige wichtige physikalische Eigenschaften der Separatoren wie beispielsweise deren thermische und mechanische Stabilität sowie das Benetzungsverhalten mit Batterie-Elektrolyten untersucht, wobei alle Messungen stets im Vergleich mit kommerziellen polymerbasierten Separatoren durchgeführt wurden.

Die im Rahmen dieser Arbeit praktisch umgesetzten Separatorenkonzepte zeigen eine Dimensionsstabilität bis Temperaturen von mindestens 600 °C und sind aufgrund des äußerst geringen Anteils organischer Bestandteile wie etwa Binder nicht brennbar. Sie sind zudem durch die Verwendung von Glasflakes mechanisch flexibel und weisen im Falle der selbsttragenden Variante des Glas-Separators ein geringes Flächengewicht von durchschnittlich nur 85 g/m<sup>2</sup> auf. Durch die Modifikation seiner

Morphologie und Materialzusammensetzung kann das elektrochemische Profil des verwendeten Separatoren-Grundglases auf unterschiedlichste Anwendungsgebiete hin optimiert werden. Für eine optimierte Langzeitstabilität mit einer maximal erreichbaren Coulomb-Effizienz von größer 99,9 % (1C, angestrebte Entladetiefe von 100 %) werden unporöse und unbehandelte Natrium-Borosilikat-Glasflakes als Separatoren verwendet. Mit dieser Konfiguration stellt sich durch eine Wechselwirkung des Glases mit dem Elektrolytleitsalz eine Modifikation der Graphit-Anode/Elektrolyt-Grenzfläche (SEI) ein. Dadurch werden elektrochemische Prozesse wie etwa die Schnellladefähigkeit mit fortschreitendem Zell-Alter verbessert. Es zeigt sich eine Steigerung selbiger um mehr als 25 % der be- bzw. entladbaren Kapazität (10C, angestrebte Entladetiefe von 100 %) im Betrachtungszeitraum von 500 Be- und Entladungen.

Erfordert der Einsatz der Zelle schnelle Lade- bzw. Entladeraten, können die Glasflakes aufgrund deren Zusammensetzung über die Vycor-Route mit einem perkolierenden Poren-Netzwerk versetzt werden. So kann die Schnellladefähigkeit im Vergleich zu unbehandelten Separatoren-Glasflakes mehr als verdoppelt werden. Hierdurch kann eine Graphit|Lithium-Eisenphosphat-Experimentalzelle auf bis zu 60 % der Nennkapazität mit 10C beladen werden.

Die erreichten spezifischen Leistungsdaten der erprobten Glas-Separatoren sind auf verschiedenste Elektroden-Aktivmaterial-Paarungen wie beispielsweise Graphit|Lithium-Cobaltoxid oder Graphit|Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxid weitestgehend übertragbar. Die Glas-Separatoren sind zudem mit kommerziell erhältlichen polymerbasierten Separatoren hinsichtlich Lade-/Entladeeffizienz vergleichbar und ermöglichen simultan eine optimierte Schnellladefähigkeit bei gleichzeitig verbesserter Benetzbarkeit mit organischen Batterie-Elektrolyten und deutlich gesteigerter Temperaturstabilität.

## Summary

As part of this work, the development of a glass-based separator for lithium-ion batteries is described, which is considerably more temperature-stable than commercial polymer-based separators. In addition, this separator is a chemically active cell component due to an interaction with the electrolyte conducting salt and contributes to the improvement of electrochemical properties of the battery cell. The separator consists of glass, whereby mainly micrometer-sized glass platelets are used. Different glass morphologies and material compositions were investigated and optimized for their electrochemical properties in organic battery electrolytes as well as in battery experimental cells using a full cell configuration. For the practical use of the glass platelets as separators, they were either integrated into a glass fiber nonwoven, which acts as a support material, or coated directly onto a battery electrode. Thus, self-supporting separators and separator/battery electrode-composites were available for characterization.

A major aspect of this work was the electrochemical characterization of the glass separators, whereby different galvanostatic analyses with diverse charge/discharge profiles as well as their influence on cell aging, predominantly in the graphite|lithium iron phosphate cell configuration, were investigated. In addition, a combination of the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and the analysis of the distribution of relaxation time constants (DRT) was used, since these methods can be used to assess some specific ageing processes and these are still mostly unknown, at least for the use of glass-based separators. The interaction of separator glass/battery electrolyte conducting salt or separator glass/electrode active materials was evaluated by means of accompanying analytical characterizations in addition to the electrochemical evaluation. Defined aged cell components were investigated by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) in *post-mortem*-analyses.

In addition to the determination of electrochemical properties, some important physical properties of the separators such as their thermal and mechanical stability as well as the wetting behaviour with battery electrolytes were investigated. These measurements were always performed in comparison to commercially available polymer-based separators.

The practically applicable separator concepts implemented in this work are showing a dimensional stability up to temperatures of at least 600 °C and are non-combustible due to the extremely low proportion of organic components such as binder materials. They are also mechanically flexible due to the use of glass platelets and show a low average weight of just 85 g/m<sup>2</sup> in case of the self-supporting glass-separator design. By modifying its morphology and material composition, the electrochemical profile of used basic separator glass can be optimized for a wide range of applications. For an optimized

long-term battery cycling stability with a maximum Coulomb efficiency of greater than 99.9 % (1C, target depth of discharge 100 %), unporous and untreated sodium borosilicate glass platelets are used as separators. With this configuration, a modification of the graphite anode/electrolyte interphase (SEI) occurs due to an interaction of the glass with the electrolyte conducting salt. This improves electrochemical processes such as the fast charging capability with progressing cell ageing and shows an increase of more than 25 % of the chargeable or dischargeable capacity (10C, target depth of discharge 100 %) in the observation period of 500 charges and discharges.

If fast charge/discharge rates are required, the glass platelets can be prepared with a percolating network of pores via the Vycor route. This doubles the rate capability compared to untreated separator glass platelets, after which a graphite|lithium iron phosphate experimental cell can be charged at up to 60 % of the nominal capacity at 10C.

The achieved specific performance data of the tested glass separators can be transferred to a wide range of electrode/active material combinations such as graphite|Lithium cobalt oxide or graphite|Lithium nickel manganese cobalt oxide. The glass separators are comparable with commercially available, polymer-based separators in terms of charge/discharge efficiency. They also enable a significantly increased rate capability with a simultaneous optimized wettability with organic battery electrolytes, as well as a significantly increased temperature stability.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>i</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Summary</b>	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlegende Zusammenhänge</b>	<b>3</b>
2.1 Lithium-Ionen-Batterien . . . . .	3
2.1.1 Prinzipieller Aufbau und Funktionsprinzip . . . . .	3
2.1.2 Elektroden-Aktivmaterialien . . . . .	4
2.1.3 Elektrolyt . . . . .	7
2.1.4 Separator . . . . .	9
2.1.5 Kinetische Prozesse und Degradationsmechanismen . . . . .	10
2.2 Glastechnologie . . . . .	14
2.2.1 Netzwerkbildner und Netzwerkwandler . . . . .	14
2.2.2 Poröse Gläser . . . . .	15
2.2.3 Herstellung flächiger Mikrometer-Glaspartikel . . . . .	16
2.2.4 Einsatz von Gläsern in Batterien . . . . .	17
2.2.5 Korrosion von Glas . . . . .	18
2.3 Elektrochemische Grundlagen . . . . .	19
2.3.1 Kenngrößen . . . . .	20
2.3.2 Konstantstromverfahren . . . . .	21
2.3.3 Elektrochemische Impedanzspektroskopie . . . . .	22
2.3.4 Methode der verteilten Relaxationszeiten . . . . .	24
<b>3. Separatoren für Lithium-Ionen-Batterien - Stand der Technik</b>	<b>27</b>
<b>4. Konzeption und Ziele der Arbeit</b>	<b>33</b>
<b>5. Experimentelle Durchführung</b>	<b>35</b>
5.1 Herstellung von Glasflakes unterschiedlicher Dicken und Morphologien . . . . .	35
5.1.1 Rotationszerstäubung von Glasschmelzen . . . . .	36
5.1.2 Vycor-Prozess . . . . .	37

5.2	Herstellung glasbasierter Separatoren . . . . .	39
5.2.1	Ausgangsmaterialien. . . . .	40
5.2.2	Selbsttragende Glasvlies/Glasflakes-Komposit-Separatoren. . . . .	42
5.2.3	Glasflakes/Batterie-Elektroden-Komposite . . . . .	42
5.3	Analyse der morphologischen und physikalischen Eigenschaften . . . . .	43
5.3.1	Zusammenfassung der eingesetzten Methoden. . . . .	44
5.3.2	Spezielle Analytik zur Charakterisierung von Separatoren . . . . .	45
5.4	Elektrochemische Charakterisierung . . . . .	47
5.4.1	Messroutine. . . . .	47
5.4.2	Elektroden-Referenzmaterialien . . . . .	48
5.4.3	Separatoren- / Elektrodenpräparation und Zell-Systeme . . . . .	50
5.4.4	Modellierung und Elektroanalytik. . . . .	53
5.4.5	Zyklieprotokolle zur galvanostatischen Analyse. . . . .	54
<b>6.</b>	<b>Poröse und unporöse Glasflakes als Separatoren für Lithium-Ionen-Batterien</b>	<b>57</b>
6.1	Mikrostrukturanalyse von Glasflakes unterschiedlicher Morphologie . . . . .	58
6.2	Elektrochemisches Verhalten in Graphit Lithium-Eisenphosphat-Experimentalzellen . . . . .	62
6.3	Einfluss der Glasflake-Morphologie auf elektrochemische Eigenschaften . . . . .	67
6.4	Bewertung des Einflusses der Glasflake-Morphologie auf Eigenschaften als Separatoren in Lithium-Ionen-Batterien . . . . .	69
<b>7.</b>	<b>Einfluss der Materialzusammensetzung von Glas-Separatoren auf das elektrochemische Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien</b>	<b>73</b>
7.1	Galvanostatische Analyse verschiedener Glas-Separatoren in Graphit Lithium-Eisenphosphat-Experimentalzellen . . . . .	73
7.2	<i>Post-mortem</i> -Analyse gealterter Batterie-Elektroden und Separatoren . . . . .	76
7.3	Glas-Separatoren-induzierte und altersabhängige Entwicklung von Zell-Innen- und Phasenübergangswiderständen . . . . .	82
7.4	Bewertung des Einflusses der Glasflake-Materialzusammensetzung auf Eigenschaften als Separatoren in Lithium-Ionen-Batterien . . . . .	88
<b>8.</b>	<b>Glasbasierte Separatorensysteme</b>	<b>91</b>
8.1	Selbsttragende Glasvlies/Glasflakes-Komposit-Separatoren . . . . .	92
8.2	Glasflakes/Batterie-Elektroden-Komposite. . . . .	97
8.3	Physikalische Eigenschaften . . . . .	100
8.4	Elektrochemisches Verhalten in Graphit Lithium-Eisenphosphat-Experimentalzellen . . . . .	108
8.5	Zell-Eigenschaften mit alternativen Elektrodenmaterial-Paarungen . . . . .	119
8.6	Eigenschaftsbewertung im Vergleich zu polymerbasierten Separatoren. . . . .	121
<b>9.</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>125</b>

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>129</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>A. Geräteliste</b>	<b>135</b>
<b>B. EDV-Liste</b>	<b>137</b>
<b>C. Ergänzende Angaben und Untersuchungen</b>	<b>139</b>
<b>D. Ergänzende Berechnungen</b>	<b>155</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>Liste eigener Veröffentlichungen</b>	<b>177</b>