

Tobias Michlik

Zink-Glas-Kompositelektroden  
für wiederaufladbare  
Zink-Luft-Batterien



# **Zink-Glas-Kompositelektroden für wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

Tobias Michlik, M.Sc.

aus

Bamberg

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Zweitgutachterin:

Prof. Dr.-Ing. Christina Roth

Tag der mündlichen Prüfung:

20. Januar 2023

Lehrstuhl für Werkstoffverfahrenstechnik

Universität Bayreuth

2023



Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen

Band 20

**Tobias Michlik**

**Zink-Glas-Kompositelektroden für wiederaufladbare  
Zink-Luft-Batterien**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9059-8

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**

Zink-Luft-Batterien besitzen eine hohe massebezogene Energiedichte und der Rohstoff Zink ist weltweit gut verfügbar und preisgünstig. Zink-Luft-Batterien sind aber derzeit nur als Primärbatterien im technischen Einsatz. Bekannt sind sie als Knopfzellen für Hörgeräte. Das System Zink-Luft wird (noch) nicht für Sekundärzellen genutzt, da das Anodenmaterial Zink bei der Entladung teilweise zu Zinkoxid oder Zinkhydroxid umgesetzt und dadurch passiviert wird. Weiterhin lagern sich die Aktivmaterialien während des Ladens und des Entladens um und die aktive Oberfläche verringert sich. Dadurch reduziert sich die Batteriekapazität und es kann bei darauffolgenden Ladevorgängen sogar zum Wachstum kurzschlussbildender Zink-Dendriten kommen.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist es, mittels gezielter materialwissenschaftlicher Maßnahmen, die vor allem die Beschichtung von Zinkanodenmaterialien mit verschiedenen, mit Additiven versehenen, Gläsern zu Zink-Glas-Kompositen umfassen, die o.g. Prozesse zu unterdrücken und die Wiederaufladbarkeit von Zink-Luft-Batterien in einem wässrigen KOH-Elektrolyten zu verbessern. Mit den Zink-Glas-Kompositen sollen also – so der Gedankengang zu Beginn der Arbeit – sowohl die Zinkanode reversibel gestaltet werden als auch Zinkhydroxidbestandteile in der Glasbeschichtung immobilisiert werden.

Dazu werden verschiedene Gläser hergestellt und damit Zinkpartikel mittels eines mechanischen Verfahrens beschichtet. Nach ersten Charakterisierungen werden vielversprechende Zink-Glas-Komposite mit unterschiedlichen Bindern versehen. In einem Rakelprozess werden damit Vollzellen hergestellt. Anhand dieser Zink-Luft-Vollzellen wird die Frage diskutiert, ob und inwieweit eine Glasbeschichtung von Zinkpartikeln zu einer Erhöhung der Zyklenstabilität von Zink-Luft-Batterien beitragen und damit dieser prinzipiell vielversprechenden Batterietechnologie zu einem Durchbruch verhelfen kann. Dazu werden die Zellen elektrochemisch vermessen und die Zellen auch post mortem materialwissenschaftlich analysiert. Die Ergebnisse werden bewertet und mit der Literatur verglichen.

Bayreuth im Februar 2023

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



*Für meine Eltern*





## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Zunächst danke ich herzlich Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos die Betreuung meiner Dissertation, nach dem Tod von Prof. Dr. Monika Willert-Porada, übernommen zu haben. Dies war nicht selbstverständlich. Weiterhin möchte ich mich für die herzliche Aufnahme in den Lehrstuhl und die vielen Diskussionsrunden, die diese Arbeit im Besonderen bereichert haben, bedanken. Der konstruktive Austausch und die regelmäßigen Gespräche waren stets eine große Hilfe für mich, die Motivation und Freude an der Arbeit aufrecht zu erhalten. Dank Ihrer Begeisterung für die Wissenschaft und für das Thema dieser Arbeit hat mir die Zusammenarbeit beständig große Freude bereitet – vielen Dank dafür.

Mein außerordentlicher Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Christina Roth für die herzliche Aufnahme und Übernahme in ihre Arbeitsgruppe. Vielen Dank für die zahlreichen Anregungen, konstruktiven Hinweise und Ratschläge, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. In jeder Phase dieser Dissertation war ihr anspornender Enthusiasmus Inspiration und Motivation zugleich.

Bei Prof. Dr.-Ing. Thorsten Gerdes möchte ich mich vor allem für die wissenschaftliche Hilfestellung zum Thema Glas, das einen großen Teil dieser Arbeit eingenommen hat, bedanken. Nach dem Tod von Prof. Dr. Monika Willert-Porada hat er kommissarisch die Leitung übernommen, die Gruppe zusammengehalten und sich für die Weiterführung meiner Promotion eingesetzt. Ein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Andreas Rosin für die engagierte Betreuung, zahlreichen Hilfestellungen und das stets offene Ohr vom ersten Tag an. Ohne die langen und konstruktiven Diskussionen und Ideen wäre diese Arbeit nicht so geworden wie sie ist.

Ganz herzlich möchte ich den Kollegen vom Lehrstuhl Werkstoffverfahrenstechnik – namentlich vor allem Dr.-Ing. Patrick Heimerdinger, Dr.-Ing. Ulrich Schadeck, Dr.-Ing. Olga Isakin, Dr.-Ing. Manuela Schmid, Michael Fink, Sebastian Müllner, Tilo Held, Marius Gernhard, Hendrik Hoffmann und Dominik Helling – für die immer offene und heitere Atmosphäre danken, die auch in den anstrengenden Zeiten der Promotion geholfen hat, die Freude an der Arbeit nicht zu verlieren. Ein großes Dankeschön geht an meinen Bürokollegen Maximilian Kutter, für den wissenschaftlichen Austausch und die gemütlichen Stunden im Büro.

Des Weiteren danke ich sehr den Technikern Philipp Ponfick und Stefan Hofmann für die Probenpräparation und die Hilfe bei technischen Aufbauten. Den Technikern Ingrid Otto, Angelika Kreis, Margrit Fuchs, Lena Geilling danke ich für die umfassende Unterstützung bei der Materialcharakterisierung sowie Kerstin Söllner für die organisatorische Hilfestellung.

Thomas Schmid gilt ebenfalls ein großes Dankeschön. Im Rahmen seiner Masterarbeit hat er engagiert mit mir zusammen im Labor gestanden und experimentiert.

Ein ebenso großer Dank geht an Matthias Welzl, der in unzähligen Kaffee- und Mittagspausen mit mir diskutiert und mir sowohl beruflich als auch privat stets eine große Unterstützung war. In ganz besonderem Maß möchte ich meinen Eltern danken. Meiner Mutter für den stetigen Ansporn, die immer aufmunternden Worte und das Verständnis, was mir ein großer Halt war und ist. Meinem Vater für die Ermunterung zum Studium, die Unterstützung von Anfang an und dass er stets an mich geglaubt hat, auch wenn er leider den Antritt und den Abschluss

meiner Promotion nicht mehr miterleben konnte. Meinem Bruder möchte ich an dieser Stelle ebenso danken, dafür, dass er mir immer mit seiner Expertise zur Seite stand und auch bei kniffligen Problemen immer eine Lösung wusste.

Ein besonderer Dank gilt meiner Verlobten, Jenny Schwerin, für ihre unerschütterliche Unterstützung und ihr Verständnis über viele Jahre hinweg. Ohne sie und ihren Rückhalt wäre die Anfertigung dieser Dissertation nicht möglich gewesen.

## Kurzzusammenfassung

Eine vielversprechende elektrochemische Technologie zur Speicherung von überschüssiger Energie aus erneuerbaren Energien ist die Zink-Luft-Batterie. Entscheidende Vorteile dieser Batterietechnologie sind deren hohe gravimetrische Energiedichte, die gute Verfügbarkeit des Aktivmaterials Zink, die hohe Betriebssicherheit sowie die gute Recyclingfähigkeit. Dennoch ist es trotz intensiver Forschungsarbeit in den letzten Jahrzehnten noch nicht gelungen, eine im kommerziellen Maßstab verfügbare elektrisch wiederaufladbare Zink-Luft-Batterie zu entwickeln.

Die Ursachen hierfür sind vielseitig und umfassen Probleme an nahezu allen Batteriekomponenten, wobei sich im Speziellen die Entwicklung einer reversiblen Zinkanode als besondere Herausforderung herausgestellt hat. Diese unterliegt mehreren Degradationsmechanismen wie irreversible Passivierung, Korrosion, Formänderung und Dendritenbildung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich damit die genannten Degradationsmechanismen durch ein innovatives Materialkonzept zu verringern, indem die aus der Literatur bekannten Ansätze „Beschichtung von Zinkpartikeln“ und „die Zugabe von Additiven“ in dem Beschichtungswerkstoff Glas vereint werden. Die zentralen Aspekte der Degradationsmechanismen, die Diffusion von  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -Ionen während der Entladephasen sowie die irreversible Passivierung durch  $\text{ZnO}$ -Schichtbildung sollen dadurch minimiert werden.

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Herstellung und Charakterisierung von Gläsern der Zusammensetzung  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-ZnO}$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$  und  $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ . Die Analysen zeigen, dass eine allgemeine Aussage bezüglich des zu verwendeten Schmelzriegels und der Schmelztemperatur, um eine amorphe Glasstruktur zu erhalten, nicht möglich ist und für jedes Glas eine individuelle Herstellungsrouten gewählt werden muss. Hierbei spielt insbesondere das Zwischenoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  eine entscheidende Rolle im Glasbildungsprozess, da dieses in Abhängigkeit von der Glaszusammensetzung den Glasbildungsprozess fördert ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$ -Glas) oder behindert ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-ZnO}$ -Glas). Durch eine Optimierung der Herstellungsparameter zeigt sich jedoch, dass für jedes Glas Kristallisation vermieden wird und eine amorphe Glasstruktur entsteht, in die  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -Ionen eingelagert werden können. Die chemische Stabilität der Gläser ist insbesondere von  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -haltigen Gläsern in KOH gering, was dazu führt, dass aufgrund schwacher Bi-O-Bindungen des Netzwerkbildners  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  die amorphe Glasstruktur bereits nach kurzer Zeit aufgelöst wird. Eine erhöhte Stabilität zeigt jedoch das Glas mit CaO-Anteil, welches in KOH Calciumzinkate ausbildet.

Die verbesserte Reversibilität der Zinkanode durch das mechanische Beschichten von Zinkpartikeln mit einer Glasschicht zeigt sich im zweiten Abschnitt dieser Arbeit anhand von Halbzellenmessungen in KOH. Hier lässt sich feststellen, dass durch die aufgebrauchte Glasschicht und hierbei im Besonderen durch das Glas  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -Ionen sowohl durch physikalische Blockierung als auch durch chemische Bindung mit Hilfe des Glasbestandteils CaO unter Bildung von Calciumzinkaten innerhalb der Glasschicht immobilisiert werden und zu einer erhöhten Reversibilität der Zinkanode beitragen. Darüber hinaus bilden  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -haltige Gläser ein elektrisch leitfähiges Gerüst aus metallischem Bismut innerhalb der sich bildenden  $\text{ZnO}$ -Schicht und reduzieren die Degradation durch irreversible Passivierung. Durch die

verringerte Diffusion der  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -Ionen innerhalb der Glasschicht wird zudem die Degradation durch Formänderung und Dendritenbildung verhindert. Die Korrosion mit Selbstentladung der Zinkanode unter  $\text{H}_2$ -Entwicklung kann durch die Glasbeschichtung aufgrund der geringen Stabilität der  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -haltigen Gläsern nicht verringert werden und nimmt, aufgrund eines katalytischen Effekts von  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mit der Zinkoberfläche, entgegen der Annahme erheblich zu. Dennoch zeigen Zink-Glas-Komposite im Halbzellenaufbau eine gesteigerte Reversibilität gegenüber unbeschichteten Zinkpartikeln, da drei der vier Degradationsmechanismen der Zinkanode vollständig oder teilweise verhindert werden.

Der letzte Abschnitt untersucht eingehend die Auswirkungen variierender Binderzusammensetzungen, bestehend aus Na-CMC-Binder und SBR-Binder, auf die elektrochemische Leistungsfähigkeit von Filmelektroden mit unbeschichteten Zinkpartikeln und dem Zink-Glas-Komposit als Aktivmaterial im Zink-Nickel- und Zink-Luft-Vollzellenaufbau. Daraus geht hervor, dass die Binderzusammensetzung einen erheblich Einfluss auf die Eigenschaften der Filmelektroden hat und eine Pastenrezeptur mit einem Binderanteil von 1,5 wt.-% SBR-Binder und 4,5 wt.-% Na-CMC-Binder zu bevorzugen ist, da diese einen guten Kompromiss hinsichtlich Biegebeanspruchung, Haftfestigkeit, elektrischer Leitfähigkeit und elektrochemischer Leistungsfähigkeit im Zink-Nickel-Vollzellenaufbau aufweist. Die elektrochemischen Messungen im Zink-Luft-Vollzellenaufbau bestätigen die Messungen aus dem Halbzellenaufbau, wonach die Glasbeschichtung die irreversible  $\text{ZnO}$ -Schichtbildung sowie die Degradation durch Formänderung reduziert und zu einer erhöhten Zyklenstabilität der Zinkanode in der Zink-Luft-Batterie beiträgt.

## Abstract

A promising electrochemical technology for storing excess energy from renewable sources is the zinc-air battery. The key advantages of this battery technology include its high gravimetric energy density, good availability of the active material zinc, high operational reliability and good recyclability. Nevertheless, despite intensive research work in recent decades, it has not been possible to develop an electrically rechargeable zinc-air battery available on a commercial scale.

Reasons for this are manifold and include problems with almost all battery components. In particular, the development of a reversible zinc anode has proven to be a special challenge. It is exposed to several degradation mechanisms such as irreversible passivation, corrosion, shape change and dendrite formation. This work focuses on reducing the above-mentioned degradation mechanisms through an innovative material concept by combining the approaches known from the literature "coating of zinc particles" and "the addition of additives" in the coating material glass. The central aspects of the degradation mechanisms, the diffusion of  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -ions during the discharge processes and the irreversible passivation due to ZnO layer formation should be minimised.

The first part of this thesis deals with the preparation and characterisation of glasses with the composition  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-ZnO}$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$  and  $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ . The analyses show that a general conclusion regarding the crucible and melting temperature to be used in order to obtain an amorphous glass structure is not possible and that an individual manufacturing route must be selected for each glass. In particular, the intermediate oxide  $\text{Al}_2\text{O}_3$  plays a critical role in the glass formation process, as it promotes ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$  glass) or hinders ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-ZnO}$  glass) the glass formation process depending on the glass composition. However, by optimising the manufacturing parameters, it is shown that for each glass crystallisation is avoided and an amorphous glass structure is formed in which  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -ions can be incorporated. The chemical stability of the glasses is low, especially of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -containing glasses in KOH, which leads to the dissolution of the amorphous glass structure after a short time due to weak Bi-O bonds of the network former  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . However, glass with CaO, which forms calcium zincate in KOH, shows increased stability.

The improved reversibility of the zinc anode by mechanically coating the zinc particles with a glass layer is demonstrated in the second section of this work by means of half-cell measurements in KOH. It can be determined that due to the applied glass layer and in particular due to the glass  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -ions are immobilised within the glass layer by physical blocking as well as by chemical bonding with the help of the glass component CaO to form calcium zincate and contribute to an increased reversibility of the zinc anode. Furthermore,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -containing glasses form an electrically conductive backbone of metallic bismuth within the forming ZnO layer and reduce degradation by irreversible passivation. The reduced diffusion of the  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ -ions within the glass layer also prevents degradation through shape change and dendrites. Corrosion with self-discharge of the zinc anode under  $\text{H}_2$  evolution cannot be reduced by the glass coating due to the low stability of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -containing glasses and, contrary to the assumption, increases significantly because of a catalytic effect of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  with

the zinc surface. Nevertheless, zinc-glass composites in the half-cell configuration show an increased reversibility compared to uncoated zinc particles, since three of the four degradation mechanisms of the zinc anode are completely or partially prevented.

The last section investigates in detail the effects of varying binder compositions consisting of Na-CMC binder and SBR binder on the electrochemical performance of film electrodes with uncoated zinc particles and the zinc-glass composite as the active material in zinc-nickel and zinc-air full cell configuration. The results show that the binder composition has a significant influence on the properties of the film electrodes and that a paste mixture with a binder content of 1.5 wt.-% SBR binder and 4.5 wt.-% Na-CMC binder is to be preferred, as it offers a good compromise in terms of resistance to bending, adhesive strength, electrical conductivity and electrochemical performance in zinc-nickel full cell configuration. The electrochemical measurements in zinc-air full cell configuration confirm the measurements from the half cell configuration, according to the fact the glass coating reduces the irreversible ZnO layer formation as well as the degradation due to shape change and contributes to an increased cycling stability of the zinc anode in the zinc-air battery.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung und Konzept der Arbeit</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Grundlagen</b> .....	<b>8</b>
3.1 Aufbau und Funktionsweise elektrochemischer Energiespeicher .....	8
3.2 Elektrochemische Grundlagen .....	9
3.2.1 Thermodynamische und kinetische Prozesse .....	9
3.2.2 Elektrische Kenngrößen einer Batterie.....	12
3.3 Funktionsweise von Zink-Luft-Batterien.....	14
3.4 Stand der Technik von sekundären Zink-Luft-Batterien .....	18
3.4.1 Zyklenbegrenzende Mechanismen der Zinkanode.....	18
3.4.2 Strategien zur Verringerung der Zinkdegradation.....	21
3.4.3 Fertigungsverfahren und Bindersysteme für Zinkanoden .....	25
3.5 Grundlagen von sekundären Nickel-Zink-Batterien .....	28
3.6 Glasbildung und Glasstruktur .....	28
<b>4 Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>33</b>
4.1 Partikuläre Zinkpulver .....	33
4.2 Synthese bismutoxid-/lithiumoxidhaltiger Gläser .....	33
4.2.1 Glassystem $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-ZnO}$ .....	33
4.2.2 Glassystem $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaO-ZnO}$ .....	34
4.2.3 Glassystem $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ .....	35
4.3 Mechanischer Beschichtungsprozess .....	35
4.4 Filmelektrodenpräparation.....	36
4.4.1 Herstellung der Elektrodenpaste.....	36
4.4.2 Elektrodenherstellung im Rakelverfahren.....	37
4.5 Zellaufbau und elektrochemische Untersuchungsmethoden .....	37
4.5.1 Halbzellenaufbau mit Pulverschüttungen .....	37
4.5.2 Vollzellenaufbau mit Filmelektroden in Zn/NiOOH-Zellen.....	39
4.5.3 Vollzellenaufbau mit Filmelektroden im Zn/O <sub>2</sub> -Aufbau .....	40



4.6	Charakterisierungsmethoden .....	42
4.6.1	Materialcharakterisierungsmethoden .....	42
4.6.2	Sonstige Charakterisierungsmethoden .....	44
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>48</b>
5.1	Charakterisierung bismutoxid-/lithiumoxidhaltiger Gläser .....	48
5.1.1	Einfluss von Temperatur und Schmelztiegel auf den Glasbildungsprozess .....	48
5.1.2	Chemische Stabilität bismutoxid-/lithiumoxidhaltiger Gläser gegenüber Kalilauge .....	59
5.1.3	Mechanische Stabilität bismutoxid-/lithiumoxidhaltiger Gläser.....	67
5.2	Charakterisierung der Zinkpartikel und der beschichteten Zink-Glas-Komposite ....	69
5.2.1	Beschichtungsgüte in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern Zeit und Rotordrehzahl für Pb-haltige Zinkpartikel.....	69
5.2.2	Beschichtungsgüte in Abhängigkeit von der Glaszusammensetzung für Pb-freie Zinkpulver.....	76
5.2.3	Korrosionsverhalten und chemische Stabilität unbeschichteter und beschichteter Zinkpartikel .....	82
5.3	Elektrochemische Eigenschaften der Zinkelektroden im Halbzellenaufbau .....	88
5.3.1	Einfluss von Glasbeschichtungsanteil und Homogenität auf die Zyklenstabilität .....	89
5.3.2	Reversibilität der Zinkelektrode in Abhängigkeit vom Glassystem.....	96
5.3.3	Effekt der Elektrolytkonzentration auf die Zyklenstabilität.....	105
5.3.4	Auswirkung von Calciumzinkaten auf die Zyklenstabilität.....	109
5.3.5	Bedeutung der chemischen Alterung und C-Rate für die Zyklenstabilität ..	113
5.4	Charakterisierung der Filmelektroden.....	118
5.4.1	Einfluss der Binderrezeptur und der Glasbeschichtung auf die Schichtdicke und Porosität .....	118
5.4.2	Funktion der Binderzusammensetzung und der Glasbeschichtung für die Elastizität der Filmelektroden .....	125
5.4.3	Beeinflussung der Haftungseigenschaften und elektrischen Leitfähigkeit der Filmelektroden durch die Binderzusammensetzung .....	128
5.4.4	Haftungseigenschaften und elektrische Leitfähigkeit der glasbeschichteten Filmelektroden in Abhängigkeit von dem Binderanteil .....	131
5.5	Elektrochemische Eigenschaften der Filmelektroden im Zn/NiOOH-Vollzellen- aufbau.....	133
5.5.1	Einfluss der Binderzusammensetzung und Glasbeschichtung auf die Zyklenstabilität .....	134
5.5.2	Post-Mortem-Analyse der Elektroden nach den Zn/NiOOH-Vollzellen- tests.....	139

---

5.6	Elektrochemische Eigenschaften der Filmelektroden im Zn/O <sub>2</sub> -Vollzellenaufbau .	141
5.6.1	Einfluss der Glasbeschichtung auf die Zyklenstabilität .....	141
5.6.2	Post-Mortem-Analyse der Elektroden nach den Zn/O <sub>2</sub> -Vollzellentests .....	145
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>147</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>154</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>171</b>
	<b>Verzeichnis der eigenen Publikationen .....</b>	<b>183</b>