

Abschlussbericht zu den in den wettbewerblichen Verfahren der Leibniz-Gemeinschaft geförderten Vorhaben

Titel des Vorhabens:

Neue Kohlenstoff-Metalloxid-Nanohybride für effiziente Energiespeicherung und Wasserentsalzung / New Carbon-Metal Oxide Nanohybrids for Efficient Energy Storage and Water Desalination (CarMON)

Projektnummer/Aktenzeichen:

FKZ SAW-2017-INP-1

Executive Summary

Im durch die Leibniz Gemeinschaft geförderten Projekt CarMON der Partner INP - Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie in Greifswald, INM - Leibniz-Institut für Neue Materialien in Saarbrücken und MPIE – Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf wurden neue Materialien für Lithium-Ionen-Batterien und Wasserentsalzung entwickelt, ihr elektrochemisches Verhalten untersucht und die Eigenschaften mit ihrer Nanostruktur korreliert. Die Kooperationspartner INP und MPIE entwickelten mehrere vielversprechende Syntheseprozesse für ein Kohlenstoff/Metalloxid-Kern/Schale-Hybridmaterial: Plasma-Ionen-gestützte Deposition, Plasma-in-Flüssig-Synthese, Elektrosponnen in Kombination mit thermischer Sulfidierung und weitere nasschemische Verfahren. Das MPIE untersuchte die Nanostruktur mit Hilfe der (Raster)Transmissionselektronenmikroskopie, energiedispersiven Röntgenspektroskopie, der Elektronenenergieverlustspektroskopie und der Elektronentomografie. Im Ergebnis wurden in Korrelation zwischen Plasmaeigenschaften und Prozessparametern und der Formation von verschiedenen Strukturen und Morphologien des Metalloxides und der Kohlenstoffmatrix beobachtet. Ein Benchmark-Material wurde als Anode für Lithium-Ionen-Batterien getestet und zeigte nach 500 Zyklen eine verbesserte Leistung im Potenzialbereich von 0,01-3,00 V gegenüber Li/Li⁺. Die vielversprechenden Ergebnisse zeigen bereits die hohe Attraktivität der entwickelten Erzeugungsverfahren und des Hybridmaterials für zukünftige Batterieanwendungen.

Das Materialsystem wurde von Kohlenstoff/Metalloxid-Hybriden auf Sulfide erweitert. So führte das Elektrosponnen von Vanadiumoxid-Fasermatten und die anschließende thermische Sulfidierung mit H₂S bei erhöhter Temperatur zu einem interessanten Hybridverbundstoff. Dieser bestand aus Vanadiumsulfidpartikeln, die in den Oberflächenbereich der hergestellten Kohlenstofffasern eingebettet waren, wie anhand von EDS-Mapping im STEM-Modus gezeigt werden konnte. Die elektrochemischen Eigenschaften wurden untersucht und festgestellt, dass sich das Material bei einem Betrieb zwischen 0,1 V und 3,0 V gegen Li/Li⁺ schnell abbaut. Es wurde jedoch eine verbesserte Zyklenstabilität beobachtet, wenn die obere Spannung auf 1,2 V gegen Li/Li⁺ gesenkt wurde. Ein weiteres interessantes Niobdisulfid/Kohlenstoff-Hybridmaterial mit mesoporöser Struktur wurde unter Verwendung eines Blockcopolymers und eines metallorganischen Niob-Vorläufers synthetisiert. Die STEM-Daten zeigten ein sehr regelmäßiges 3D-Netzwerk mit einer Kanalgröße von etwa 20-30 nm. Diese gyroidale Morphologie war vorteilhaft für die Verwendung als Elektrode in Lithium-Ionen-Batterien und führte zu einer hohen volumetrischen Kapazität von bis zu 150 mAh/cm³. Aus der Zusammenarbeit der Partner resultierten 21 Publikationen und zwei Qualifikationsarbeiten.

1. Zielerreichung und Umsetzung der Meilensteine

Der Ausgangspunkt des CarMON Projektes war die synergetische Kombination aus elektrisch leitfähigem (nanoskaligen) Kohlenstoff und elektrochemisch aktiven Metalloxiden. Im Vordergrund stand im Rahmen des Projektes hierbei die elektrochemische Energiespeicherung. Hierzu kamen die folgenden Synthesemethoden zum Einsatz: Plasmaverfahren (INP), Elektrosponnen mit verbundener in situ Sol-Gel-Synthese (INM), konventionelle Sol-Gel-Synthese (INM), Atomlagenabscheidung auf Nanokohlenstoffen (INM), Chloroxidierung von Karbiden (INM), makromolekulare Selbstanordnung (INM) und polymer-abgeleitete Materialsynthese (INM). Am INP wurden für die Synthese der Elektrodenmaterialien verschiedene Plasmaverfahren für die Erzeugung von Nanohybriden entwickelt, wobei ein Verfahren durch umfangreiche plasmadiagnostische Analysen hinsichtlich der Plasmaeigenschaften begleitet wurde, um Rückschlüsse zu Korrelationen zwischen Materialeigenschaften und Eigenschaften des Plasmas für die Synthese zu erlauben. In der ersten Projektphase wurde die Entwicklung eines PIAD (Plasma Ion Assisted Deposition) Verfahrens vorgenommen, um unter Verwendung eines festen Präkursors Nanopartikel auf Kohlenstoffträger abzuscheiden. Durch Variation des Prozessfensters zur Generierung der Plasma-Ionen konnten verschiedene kristallographische und mikrostrukturelle Eigenschaften des Metalloxides, beispielsweise V_2O_5 , erzielt und Korrelationen zwischen Plasma und Entladungsspannung der Plasmaquelle etabliert werden. In der zweiten Projektphase wurde ein neuartiges Plasma-In-Liquid (PiL)-Verfahren entwickelt. Das PiL-Verfahren weist dabei ein immenses Potential für die rapide in-situ Erzeugung von Kompositen und Hybriden auf, beispielsweise Vanadiumoxid-Graphen-Hybride, wobei eine hohe Flexibilität durch die Möglichkeit zur modularen Versuchsdurchführung gegeben ist. Aufgrund ihrer allgemeinen Ähnlichkeit sind verschiedene Strukturtypen von Übergangsmetalloxidischen Nanokristalliten durch Röntgen- oder Elektronenbeugungstechniken oft nur sehr schwer zu unterscheiden. Am MPIE wurde aus diesem Grund mit Hilfe der Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie (EELS) im STEM-Verfahren der Oxidationszustand des Metalles (Vanadium) durch Unterschiede in der Energieverlust-Nahkantenstruktur (ELNES) bestimmt. Aus dieser Fingerprint-Analyse wurden Rückschlüsse auf den Strukturtyp des Oxids gezogen. In Bezug auf die Anwendung als Energiespeicher ist die zentrale Bedeutung einer homogenen Phasenverteilung klar erkennbar. Die elektrisch leitfähige Phase und die elektrochemische Aktivphase müssen homogen auf einer Größenlängenskala von etwas unter 100 nm verteilt sein. Für Materialien mit großer Volumenausdehnung existieren hierbei besondere Herausforderungen, denn Rissbildung und die physikalische Entkopplung von Aktivmaterialbruchstücken von der Gesamtelektrode führen unweigerlich zu einem irreversiblen Verlust der Energiespeicherfähigkeit. Diese Betrachtungen gelten in ähnlicher Weise für die Ratenfähigkeit, wobei hier auch in besonderem Maße die Gesamtelektrodenstärke und etwaige Bindemittel starken Einfluss auf die Kinetik des Energiespeicherprozesses haben. Sind die Elektroden-Design-Aspekte jedoch optimiert, sind auch Elektrodenstärken von mehreren 100 μm sowie monolithische Elektroden mit damit deutlich verbesserter Leistungsperformanz pro Volumeneinheit möglich. Eine deutliche Verbesserung der Zyklenfestigkeit konnte auch durch eine Reduzierung des Spannungspotentials und damit des „state of charge“ erreicht werden; das nicht vollständige Laden und Entladen von Batteriematerialien steht jedoch im Widerspruch zu dem Anspruch, ein Maximum an Performanz durch Energiematerialien zu erreichen; in der realen Anwendung muss es daher zu einer Optimierung von Lebensdauer und Leistungsfähigkeit kommen, die es gilt, speziell auf spezifische Anwendungsfelder (Schnellladefunktion vs. Dauerladefunktion) abzustimmen. Die direkte Nutzung von hybriden Elektrodenmaterialien zur

Meerwasserentsalzung ist ein vielversprechendes Forschungsthema mit großem Anwendungspotential. Im Rahmen des Projektes wurde dieser signifikante Paradigmenwechsel im Rahmen zweier Übersichtsartikel in Nature Reviews Materials und Chemical Reviews in Bezug auf die Mechanismen und Anwendungen aufbereitet und ausgeführt.

2. Aktivitäten und Hindernisse

Die Kooperationspartner INP und MPIE entwickelten mehrere vielversprechende Syntheseprozesse für ein Kohlenstoff/Metalloxid-Kern/Schale-Hybridmaterial: ein Plasma-Ionen-gestützte Deposition, Plasma-in-Flüssig-Synthese, Elektrosponnen in Kombination mit thermischer Sulfidierung und andere nasschemische Verfahren. Das MPIE untersuchte die Nanostruktur mit Hilfe der (Raster)Transmissionselektronenmikroskopie, energiedispersiven Röntgenspektroskopie, der Elektronenenergieverlustspektroskopie und der Elektronentomografie. Verschiedene Betriebsparameter der unterstützenden End-Hall-Plasmaquelle, nämlich die Entladungsspannung (V_d) und der Strom (I_d), wurden systematisch variiert, um die Korrelation zwischen der Ionengeschwindigkeitsverteilung und den Materialeigenschaften herzustellen. Die Ionenenergieverteilung wurde mit Hilfe eines Verzögerungsfeld-Energieanalysators untersucht. Im PiL-Verfahren wurde Vanadiumoxid in verschiedenen Kristallstrukturen und Graphen erzeugt, wobei die Morphologie der entstehenden Partikel kontrolliert und in einzigartigen Formen wie Nanofasern und Nanokorallen erzeugt wurden, in Abhängigkeit von Präkursor, pH-Wert und Plasmaparametern wie Frequenz, Pulsbreite und Spannung. Das Materialsystem wurde im nächsten Schritt von Kohlenstoff/Metalloxid-Hybriden auf Sulfide ausgeweitet. So führte das Elektrosponnen von Vanadiumoxid-Fasermatten und die anschließende thermische Sulfidierung mit H_2S bei erhöhter Temperatur zu Vanadiumsulfidpartikeln, die in den Oberflächenbereich der hergestellten Kohlenstofffasern eingebettet waren. Die elektrochemischen Eigenschaften wurden untersucht und festgestellt, dass sich das Material bei einem Betrieb zwischen 0,1 V und 3,0 V gegen Li/Li⁺ schnell abbaut. Es wurde jedoch eine verbesserte Zyklenstabilität beobachtet, wenn die obere Spannung auf 1,2 V gegen Li/Li⁺ gesenkt wurde. Ein weiteres interessantes Niobdisulfid/Kohlenstoff-Hybridmaterial mit mesoporöser Struktur wurde unter Verwendung eines Blockcopolymers und eines metallorganischen Niob-Vorläufers synthetisiert. Die STEM-Daten zeigten ein sehr regelmäßiges 3D-Netzwerk mit einer Kanalgröße von etwa 20-30 nm. Diese gyroidale Morphologie war vorteilhaft für die Verwendung als Elektrode in Lithium-Ionen-Batterien und führte zu einer hohen volumetrischen Kapazität von bis zu 150 mAh/cm³.

Verzögerungen traten im Projekt auf durch eine späte Einstellung von Personal am INP und MPIE. Weitere Herausforderungen entstanden im Projektverlauf durch Instabilitäten des Prozesses im PIAD-Reaktor am INP. Dazu stellte sich eine nur begrenzte Eignung des PIAD Prozesses für die Synthese von porösen Nanohybriden mit hoher spezifischer Oberfläche heraus. Da ein Forschungsziel in CarMON die Erarbeitung von Korrelationen zwischen Plasmaeigenschaften und Struktur war, wurden die Diagnostik-Arbeiten mit Hinblick auf ein weiteres Anwendungsgebiet, der Elektrochromatik, weitergeführt. Mit Hinblick auf die Anwendungen Energiespeicherung und Wasserentsalzung wurde der Fokus am INP in Folge auf ein neuartiges PiL-Syntheseverfahren gesetzt, das ein sehr hohes Potential für die Erzeugung von Nanohybriden für Elektrodenanwendungen aufweist. Sehr bedauerlich war das Ausscheiden des fachlichen Betreuers für den Doktoranden am INP im Projektzeitraum.

3. Ergebnisse und Erfolge

Folgende zentrale Ergebnisse wurden im CarMON-Projekte erzielt:

- Optimierter und stabiler PIAD-Prozess für die Synthese von Vanadiumoxid-Nanolayers mit präzis-steuerbarer Kristall- und Mikrostruktur
- Etablierte Korrelationen zwischen PIAD Plasmaentladungsspannung, Ionisierungsgrad der reaktiven Spezies und Kristallinität von V_2O_5
- Innovativer PiL-Reaktor und neuartiges PiL-Verfahren für die Erzeugung von Vanadiumoxid-Spezies mit neuartigen Strukturen, präzise steuerbar anhand der Syntheseparameter
- Neuartiges Plasmaverfahren zur Erzeugung von Vanadiumoxid-Carbon-Nanohybriden
- Neuartiges Elektro-Spinning-Verfahren via One-Step thermischer Sulfidisierung
- Neue Analysestrategie und Untersuchungsansätze in Kombination von Elektronenmikroskopie und lokal aufgelösten Diffraktions- und spektroskopischen Methoden zur Charakterisierung von Metalloxid-Kohlenstoff-Nanohybriden auf der atomaren Skala
- neue Benchmark-Nanomaterialien (Vanadiumoxid-Carbon, Titan-Nioboxide-Carbon, Niob-sulfid-Carbon, Vanadiumsulfid-Carbon) mit attraktiver Leistungsfähigkeit für die elektrochemische Energiespeicherung und Wasserentsalzung.

Insgesamt wurden durch die Partner auf der Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse 21 Publikationen veröffentlicht, darunter auch Veröffentlichungen in renommierten Journalen wie Nature Reviews Materials, Chemical Reviews, ChemSusChem, Journal of Materials Chemistry und Chemistry of Materials, Anhang 1. Des Weiteren wurden zwei abgeschlossene Qualifikationsarbeiten erzielt. Auf der Basis der Projektergebnisse wurden weitere Drittmittel für die anwendungsnahe Weiterentwicklung der Ergebnisse mit Industriepartnern in projektbegleitenden Ausschüssen gemeinsam durch die Partner eingeworben. Beispiele erfolgreicher Projektanträge mit gemeinsamer Beteiligung der Partner sind AiF IGF 20209BG MaxCoat (INP & MPIE), AiF IGF 20939 BG (INP & MPIE) und AiF IGF 22542 VOXCoat (INM & INP). Das neue PiL-Verfahren wurde bzw. wird im INP auch im Rahmen der eingeworbenen Projekten ZIM 16KN0450245 PlasGraph, AiF IGF 221140 Strömungsreaktor, AiF IGF 22423 BG Magneli SAFC, WIR BMBF 03WIR2307C RuKat sowie TransHyDE BMBF 03HY209B KAAP-Katalysator für Anwendungen in der Energiespeicherung und -wandlung weiterentwickelt. Das Projekt wurde in einer Pressemitteilung durch das INP auch der Öffentlichkeit bekannt gemacht.

4. Chancengleichheit, Karriereförderung und Internationalisierung

Die PI's des CarMON Projektes waren Dr. Angela Kruth (INP), Prof. Volker Presser (INM) und Prof. Christina Scheu (MPIE). Damit überwiegte in der Koordination und wissenschaftlichen Leitung des Projektes der weibliche Anteil. Die Besetzung von Stellen für WissenschaftlerInnen und Doktoranden erfolgte mit jungen NachwuchswissenschaftlerInnen mit einem großen Anteil an weiblichen Personal (Samantha Husmann (INM), Anna Frank (MPIE), Sandra Peglow (INP), Camila Miron (INP), Aurora Tolosa (INM), Camila Rojas (INP), Simon Fleischmann (INM), Miguel Dias (INP), Jens Harhausen (INP) mit verschiedenen Nationalitäten (Chile, Rumänien, Südafrika, Portugal und Deutschland). Allen drei Instituten wurden der Einsatz für Chancengleichheit und Vielfalt bescheinigt.

5. Strukturen und Kooperationen

Kooperationen im Projekt verliefen sehr intensiv und erfolgreich. Im Projektverlauf wurden eine große Anzahl von Projekttreffen durchgeführt, die der wissenschaftlichen Diskussion und der Planung von Experimenten sowie der Betreuung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses dienten. Ein Austausch der Nachwuchswissenschaftler erfolgte im Rahmen von Laborbesuchen und gemeinsam durchgeführten Experimenten, die es ihnen ermöglichten, ihr Wissen zur Elektrochemie, Materialsynthese und fortgeschrittene mikrostrukturelle Charakterisierung zu erweitern, Anlage 2. Über die gesamte Projektlaufzeit wurden monatliche Online-Meetings des Projektteams für den Austausch zum monatlichen Fortschritt der Teilvorhaben und die Planung der anstehenden Arbeiten durchgeführt und eine gemeinsame Datenablage für den Austausch genutzt. Im administrativen Bereich gab es ebenfalls eine enge Zusammenarbeit. So wurde durch die Partnern INM und MPIE anhand eines speziell ausgestalteten Templateformulas ein bimonatlicher Finanzbericht an den Koordinator INP erstellt.

Neue Kooperationen im Themenfeld sind im Laufe des Projektes mit dem ZBT Zentrum für BrennstoffzellenTechnik in Duisburg, dem IOM Leibniz Institut für Oberflächenmodifikation in Leipzig, dem SKZ Das Kunststoffzentrum, dem HZG Hereon in Geesthacht, dem KIT Karlsruher Institut für Technologie sowie der Universität Rostock entstanden.

6. Qualitätssicherung

Alle drei Partner-Institute haben gute wissenschaftliche Praxis in ihren Leitbildern verankert und verfolgen in ihrer Strategie Spitzenleistungen im Einklang mit den Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis der Leibniz-Gemeinschaft und der DFG. Dies umfasst u.a. die konsequente Orientierung am internationalen Stand der Forschung und Technik und die kontinuierliche Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Methoden, eine gründliche Arbeitsweise einschließlich des stets kritischen Hinterfragens der eigenen Ergebnisse, die Achtung der wissenschaftlichen Arbeiten des Einzelnen und die Förderung der breiten Zusammenarbeit. Es wurden keine Tierversuche im Projekt durchgeführt.

7. Zusätzliche Ressourcen

Die Eigenbeiträge der Institute werden wie folgt abgeschätzt:

Am INP wurde ein Eigenbeitrag des Wissenschaftlers und Forschungsschwerpunktleiters Dr. Rüdiger Foest im Bereich Plasmadiagnostik geleistet (10%, 20.000 €). Dazu erfolgte ein Beitrag eines Technikers Karl-Heinz Schmidt im Bereich Labortechnik (5%, 10.000 €). Durch das INM wurde ein Eigenbeitrag des Institutes durch die W3-Professur Volker Presser (10%, 33,000 €) eine wissenschaftliche Mitarbeiterin (20%, 57,300 €) sowie eine Technikerin (5%, 9,000 €) geleistet.

8. Ausblick

Die erzielten Projektergebnisse eröffnen weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der Nanotechnologie und der Nanoanalytics für die Entwicklung von neuen Materialien, die dringend für die Implementierung eines nachhaltigen globalen Energiesystems benötigt werden. Korrelationen zwischen Reaktionsführung und Syntheseparametern, Kristall- und Nanostruktur sowie der Leistungsfähigkeit in der elektrochemischen Anwendung müssen weiter untersucht und in zukünftigen Fertigungsprozessen implementiert werden.

Anlage 1 Liste der Publikationen und Qualifizierungsarbeiten

Publikationen:

1. A. Frank, M. Dias, S. Hieke, A. Kruth, C. Scheu, Spontaneous fluctuations in a plasma ion assisted deposition – correlation between deposition conditions and vanadium oxide thin film growth, *Thin Solid Films* 722 (2021) 138574
2. A. Frank, T. Gänsler, S. Hieke, S. Fleischmann, S. Husmann, V. Presser, C. Scheu, STRUCTURAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF $\text{MOO}_2/\text{MOS}_2$ TRIPLE-HYBRID MATERIALS USING ELECTRON MICROSCOPY IN UP TO THREE DIMENSIONS, *Nanoscale Advances* (2021), 4
3. P. Srimuk, X. Su, J. Yoon, D. Aurbach, V. Presser, CHARGE-TRANSFER MATERIALS FOR ELECTROCHEMICAL WATER DESALINATION, ION SEPARATION AND THE RECOVERY OF ELEMENTS, *Nature Reviews Materials* 5(7) (2020) 517-538.
4. S. Husmann, Ö. Budak, A. Quade, A. Frank, A. Kruth, C. Scheu, A. Tolosa, V. Presser, ELECTROSPUN VANADIUM SULFIDE / CARBON HYBRID FIBERS OBTAINED VIA ONE-STEP THERMAL SULFIDATION FOR USE AS LITHIUM-ION BATTERY ELECTRODES, *Journal of Power Sources* 450(1) (2020) 227674.
5. W. Bodnar, M. Schiorlin, A. Frank, T. Schulz, N. Woehrl, C. Miron, C. Scheu, J. F. Kolb, A. Kruth, Synthesis of graphene-related carbon nanoparticles from a liquid isopropanol precursor by a one-step atmospheric plasma process, *Applied Surface Science* 514 (2019), 145926
6. S. Fleischmann, J.B. Mitchell, R. Wang, C. Zhan, D.E. Jiang, V. Presser, V. Augustyn, PSEUDOCAPACITANCE: FROM FUNDAMENTAL UNDERSTANDING TO HIGH POWER ENERGY STORAGE MATERIALS, *Chemical Reviews* 120(14) (2020) 6738-6782.
7. H. Shim, E. Lim, S. Fleischmann, A. Quade, A. Tolosa, V. Presser, NANOSIZED TITANIUM NIOBIUM OXIDE/CARBON ELECTRODES FOR LITHIUM-ION ENERGY STORAGE APPLICATIONS, *Sustainable Energy & Fuels* 3(7) (2019) 1776-1789.
8. J. Lee, P. Srimuk, S. Fleischmann, X. Su, T.A. Hatton, V. Presser, REDOX-ELECTROLYTES FOR NON-FLOW ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE: A CRITICAL REVIEW AND BEST PRACTICE, *Progress in Materials Science* 101(1) (2019) 46-89.
9. S. Fleischmann, T.S. Dörr, A. Frank, S.W. Hieke, D. Doblás-Jimenez, C. Scheu, P.W. de Oliveira, T. Kraus, V. Presser, GYROIDAL NIOBIUM SULFIDE / CARBON HYBRID MONOLITHS FOR ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE, *Batteries & Supercaps* 2(8) (2019) 668-672.
10. I. Sava, M. Asandulesa, K. Zocher, A. Kruth, J. Kolb, W. Bodnar, K. Witte, T. ishizaki, C. Miron, Electrical and mechanical properties of polyimide films treated by plasma formed in water and isopropanol, *Reactive and Functional Polymers* 134 (2019), 134, 22-30
11. B. Krüner, A. Schreiber, A. Tolosa, A. Quade, F. Badaczewski, T. Pfaff, B.M. Smarsly, V. Presser, NITROGEN-CONTAINING NOVOLAC-DERIVED CARBON BEADS AS ELECTRODE MATERIAL FOR SUPERCAPACITORS, *Carbon* 132(1) (2018) 220-231.
12. A. Tolosa, S. Fleischmann, I. Grobelsek, A. Quade, E. Lim, V. Presser, BINDER-FREE HYBRID TITANIUM-NIOBIUM OXIDE/CARBON NANOFIBER MATS FOR LITHIUM-ION BATTERY ELECTRODES, *ChemSusChem* 11(1) (2018) 159-170.
13. A. Tolosa, S. Fleischmann, I. Grobelsek, V. Presser, ELECTROSPUN HYBRID VANADIUM OXIDE/CARBON FIBER MATS FOR LITHIUM AND SODIUM-ION BATTERY ELECTRODES, *ACS Applied Energy Materials* 1(8) (2018) 3790-3801.

14. I. Sava, A. Kruth, J. Kolb, C. Miron, Optical properties of polyimides films treated by nanosecond pulsed electrical discharges in water, *Japanese Journal of Applied Physics* (2018), 57(1), 0102BF
15. E. Lim, H. Shim, S. Fleischmann, V. Presser, FAST AND STABLE LITHIUM-ION STORAGE KINETICS OF ANATASE TITANIUM DIOXIDE/CARBON ONION HYBRID ELECTRODES, *Journal of Materials Chemistry A* 6(20) (2018) 9480-9488.
16. B. Krüner, C. Odenwald, A. Quade, G. Kickelbick, V. Presser, INFLUENCE OF NITROGEN-DOPING FOR CARBIDE-DERIVED CARBONS ON THE SUPERCAPACITOR PERFORMANCE IN AN ORGANIC ELECTROLYTE AND AN IONIC LIQUID, *Batteries & Supercaps* 1(4) (2018) 135-148.
17. Ö. Budak, P. Srimuk, A. Tolosa, S. Fleischmann, J. Lee, S.W. Hieke, A. Frank, C. Scheu, V. Presser, VANADIUM (III) OXIDE/CARBON CORE/SHELL HYBRIDS AS AN ANODE FOR LITHIUM-ION BATTERIES, *Batteries & Supercaps* 2(1) (2019) 74-82.
18. S. Fleischmann, M. Zeiger, A. Quade, A. Kruth, V. Presser, ATOMIC LAYER DEPOSITED MOLYBDENUM OXIDE/CARBON NANOTUBE HYBRID ELECTRODES: INFLUENCE OF CRYSTAL STRUCTURE ON LITHIUM-ION CAPACITOR PERFORMANCE, *ACS Applied Materials & Interfaces* 10(22) (2018) 18675-18684.
19. S. Fleischmann, A. Tolosa, V. Presser, DESIGN OF CARBON/METAL OXIDE HYBRIDS FOR ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE, *Chemistry - A European Journal* 24(47) (2018) 12143-12153.
20. S. Fleischmann, M. Zeiger, N. Jäckel, B. Krüner, V. Lemkova, M. Widmaier, V. Presser, TUNING PSEUDOCAPACITIVE AND BATTERY-LIKE LITHIUM INTERCALATION IN VANADIUM DIOXIDE/CARBON ONION HYBRIDS FOR ASYMMETRIC SUPERCAPACITOR ANODES, *Journal of Materials Chemistry A* 5(25) (2017) 13039-13051.
21. S. Fleischmann, D. Leistenschneider, V. Lemkova, B. Krüner, M. Zeiger, L. Borchardt, V. Presser, TAILORED MESOPOROUS CARBON/VANADIUM PENTOXIDE HYBRID ELECTRODES FOR HIGH POWER PSEUDOCAPACITIVE LITHIUM AND SODIUM INTERCALATION, *Chemistry of Materials* 29(20) (2017) 8653-8662.

Qualifizierungsarbeiten:

S. Fleischmann, HYBRIDIZATION OF ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE: NANOHYBRID MATERIALS AND HYBRID CELL ARCHITECTURES FOR HIGH ENERGY, POWER, AND STABILITY, Department of Materials Science and Engineering, Saarland University, PhD, 2018, p. 173.

V. Lemkova, SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF NIOBIUM OXIDE/CARBON HYBRID MATERIALS FOR ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE, Department of Materials Science and Engineering, Saarland University, Bachelor, 2019, p. 42.

Pressemitteilung:

13.01.2017 Greifswalder Plasmaforscher erforschen Nanomaterialien für effiziente Energiespeicherung
<https://idw-online.de/de/news666296>

Anlage 2 Listen der Projekttreffen und Forschungsaufenthalte

Projekttreffen:

1. Kick-Off Projekttreffen, 08.12.2016, MPIE, Düsseldorf
2. Projekttreffen, 02.11.2017, Online
3. Projekttreffen, 14.03.2018, INP, Greifswald
4. Projekttreffen, 30.07.2018, Online
5. Projekttreffen, 04.10.2018, INM, Saarbrücken
6. Projekttreffen, 07.01.2019, MPIE, Düsseldorf
7. Projekttreffen, 27.06.2019, INP, Greifswald
8. Projekttreffen, 19.11.2019, INM, Saarbrücken
9. Projekttreffen, 16.07.2020, Online

Forschungsaufenthalte:

Miguel Dias, INP, Oktober 2017, Plasma School, Bad Honnef

Miguel Dias, INP, im September 2017 am INM in Saarbrücken

Sandra Peglow, INP, im September 2017 am MPIE in Düsseldorf

Samantha Huisman, INM, im Oktober 2018 am MPIE in Düsseldorf