

Schlussbericht

“KMU-innovativ-Supercap-Synthese und Funktionalisierung von Kohlenstoff-nanoröhren für die Verwendung in Elektrodenmaterialien von Superkondensatoren”

FKZ: 03X0076C

*A. Leonhardt, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden,
Helmholtzstr.20, 01069 Dresden*

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung
2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens
3. Planung und Ablauf des Vorhabens
4. Wissenschaftlich-technischer Stand vor dem Vorhabensstart
5. Kooperation

II. Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse
 - 1.1. Synthese der Kohlenstoffnanostrukturen
 - 1.2. Eigenschaften der Kohlenstoffnanostrukturen
 - 1.3. Lieferungen an Projektpartner
 - 1.4. Zusätzliche Arbeiten im IFW
2. Zusammenfassung, Einschätzung und Möglichkeiten der Verwertung
3. Veröffentlichungen

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Die ursprünglichen Aufgaben des IFW Dresden innerhalb des Projektverbundes "KMU-innovativ-Supercaps auf der Basis von Verbundwerkstoffen aus Carbon Nanotubes und Metalloxiden 2009-2011" bestanden in der Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für das erfolgreiche Einbetten von Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) in Elektrodenmaterialien von Superkondensatoren. Dazu wurden über verschiedene CVD-Verfahren (Festbett- und Aerosolverfahren) die CNTs mit unterschiedlichen Durchmessern/Oberflächen in ausreichenden Mengen im IFW hergestellt, gemeinsam mit dem Partner FhG IKTS entsprechende Dispersionsmittel ausgewählt und die CNTs hinsichtlich guter Dispergierbarkeit funktionalisiert. Zum Erreichen vergrößerter Oberflächen wurden CNTs durch Säurebehandlungen geöffnet. Elektrische Leitfähigkeitsmessungen mittels 4-Punkt-Methode dienten zur Vorauswahl (Maximierung) der CNTs. Um ausgerichtete CNTs herzustellen, wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt zur Abscheidung von CNTs auf -50 µm.

2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Zur erfolgreichen Bearbeitung des Vorhabens konnte das IFW seine langjährigen Erfahrungen sowohl in der Anwendung verschiedener CVD-Verfahren zur CNT-Synthese als auch in der Reinigung bzw. Charakterisierung von Kohlenstoff-Nanostrukturen einbringen. Zur CNT-Synthese existierten in unseren Laboratorien bereits entsprechende Anlagen auf Basis der Festbett-Methode und der Aerosolmethode, so dass von Anfang an definiertes Probenmaterial den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden konnte. Ebenfalls standen von Beginn an nahezu alle üblichen Verfahren zur Materialcharakterisierung zur Verfügung.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektarbeiten des IFW-Teilvorhabens wurden entsprechend dem Balkendiagramm (einschließlich Meilensteinen) des Verbundprojektes durchgeführt, wobei die Synthese entsprechender CNTs und deren termingerechte Lieferung für die Elektrodenherstellung bei dem Projektpartner im Mittelpunkt stand. Während der Projektlaufzeit wurde ein 4-Punkt-Messplatz zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit aufgebaut. Entsprechend den Festlegungen der alle halbe Jahre stattfindenden Projekttreffen wurde der Partner FhG IKTS mit CNTs unterschiedlicher Funktionalisierung/Behandlung für die Elektrodenherstellung und Messung ihrer Eigenschaften wie ESR und Kapazitäten beliefert. In der zweiten Hälfte des Projektes wurden, zusätzlich zu den Projektaufgabe Arbeiten zur direkten Abscheidung von gerichteten CNTs auf Al-Folien (letztere waren die Ausgangsfolien für die Elektroden der Supercaps) durchgeführt. Die strukturelle und physikalische Charakterisierung der hergestellten CNTs war Bestandteil aller Aktivitäten. Nach Vorcharakterisierung im IFW wurden stickstoff-dotierte multi-walled carbon nanotubes (höchste Leitfähigkeit) sowohl im as grown Zustand als auch in funktionalisierter Art (säurebehandelt, geöffnet) dem Projektpartner übergeben. Zusätzlich wurden sogenannte platelets (Kohlenstoffnanofasern hoher Reinheit) mit einer bestimmten offenen Struktur als Elektrodenmaterial geliefert.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand vor dem Vorhabensstart

Die Synthese von Kohlenstoff-Nanoröhren durch CVD-Methoden ist eine weltweit eingesetzte, wissenschaftlich und kommerziell betriebene Technologie. Insgesamt gesehen war jedoch die

Herstellung von definierten, unterschiedlichen CNT-Strukturen, ob undotiert bzw. dotiert, ihre Funktionalisierung und anschließende Dispergierung in geeigneten Lösungsmitteln für eine erfolgreiche Verwendung als Elektrodenbestandteil nicht allgemeiner Kenntnisstand und eine wissenschaftliche Herausforderung.

Versuche, Elektroden für Superkondensatoren mit Hilfe von Kohlenstoffnanoröhren herzustellen gibt es seit etwa 15 Jahren [1-8]. Dabei sollen die Eigenschaften der Nanoröhren (insbesondere große Oberfläche und hohe elektrische Leitfähigkeit) ausgenutzt werden, um außergewöhnlich hohe Kapazitäten und Leistungsdichten bzw. kurze Zeiten für Aufnahme, Speicherung und Abgabe der Energie solcher Zellen zu erreichen. In Abhängigkeit von unterschiedlichen CNTs (multi- oder single-walled tubes) mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern, unterschiedlichen Elektrolyten bzw. unterschiedlichen Elektrodenaufbau konnte nachgewiesen werden, dass CNTs hinsichtlich Kapazitätserhöhung gegenüber konventionellen Elektrodenmaterialien wie Leitruss, Graphite, eine Verbesserung erzielt werden kann [1-8]. Kapazitäten bis 250 F/g konnten erreicht werden [5]. Eine einheitliche Meinung aber über die optimale Konstitution der CNTs (Geometrie, Konzentration, Funktionalisierung usw.) existierte zum Projektstart nicht. 2009 wurde jedoch veröffentlicht [9], dass ausgerichtete (senkrecht zur Elektrodenoberfläche) CNTs hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit und damit Maximierung der Kapazitäten geeigneter erscheinen, als die üblicherweise eingesetzten „entangled CNTs“ aus Festbett-Syntheseverfahren.

Literatur:

- [1] C. Niu, E.K.Sichel, R.Hoch, D. Moy, H. Tennent: High power electrochemical Capacitors based on carbon nanotube electrodes, Appl. Phys. Letters 70 (1997) 1480- 1482
- [2] Q. Xie, X. Zhou: The study of multi-walled carbon nanotubes deposited with conducting polymer for supercapacitor, Electrochimica Acta 48 (2003) 575-580
- [3] E. Frackowiak, K. Metenier, V. Bertagna, F. Beguin; Supercapacitor electrodes from multi-walled carbon nanotubes, Appl. Phys. Letters 77 (2000) 2412-2423
- [4] K.H.An, W.S.Kim, Y.S.Lee, J.-M.Moon, D.J.Bae, S.Ch. Lim, Y.H.Lee: Electrochemical properties of high-power supercapacitors using single-walled carbon nanotube electrodes , Adv. Funct. Mater. 11 (2001) 387- 392
- [5] K.H.An, K.K.Jeon, J.K.Heo, S.Ch.Lim, D.J.Bae, Y.H.Lee: High- capacitance supercapacitor using a nanocomposite electrode of single-walled carbon nanotube and polypyrrole, J. electrochem. Soc. 149 (2002) A 1058-A 1062
- [6] J.Y.Lee, K.H.An, J.K.Heo, Y.H.Lee: Fabrication of Supercapacitor electrodes using fluorinated single walled carbon nanotubes: J. Phys. Chem. B 107 (2003) 8812-8815

- [7] B.J.Yoon, S.H.Jeong, K.H.Lee, H. S.Kim, Ch. G. Park, J.H.Han: Electrical properties of electrical double layer capacitors with integrated carbon nano-tube electrodes: Chem. Phys.Letters 388 (2004) 170-174
- [8] Ch. Du, J. Yeh, N. Pan: High power density supercapacitors using locally aligned carbon nanotube electrodes, Nanotechnology 16 (2005) 350-365
- [9] Li Li Zhang and X. S. Zhao „Carbon-based materials as supercapacitor electrodes“ Chem. Soc. Rev., 2009, 38, 2520–2531

5. Kooperationen

Innerhalb des Projektverbundes war eine enge Kooperation aller Projektteilnehmer durch die zum Teil überlappenden Arbeitsaufgaben Voraussetzung für das Erreichen des Projektzieles. Auf den regelmäßig stattgefundenen Projekttreffen wurden die einzelnen Arbeitspakete konkretisiert und die Arbeitsaufgaben aller Partner aktualisiert. Für das IFW war eine enge Zusammenarbeit mit dem IKTS zwingend geboten. Diese Zusammenarbeit war nicht nur wegen der räumlichen Nähe der beiden Institute immer gegeben sondern führte deshalb auch zu den erzielten Ergebnissen.

II. Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

1.1. Synthese der Kohlenstoffnanostrukturen

Um Carbon Nanotubes als Elektrodenmaterial erfolgreich einzusetzen, sollten diese eine möglichst große Oberfläche und eine maximale elektrische Leitfähigkeit besitzen. Deshalb wurden im IFW in Vorversuchen CNTs über zwei unterschiedliche Verfahren (Festbett und Floating Verfahren) hergestellt. Darüber hinaus wurden zwei Typen Kohlenstoffnanofasern (herringbones, platelets) in hoher Reinheit synthetisiert und deren Eigenschaften untersucht.

- Festbett-CVD

Bei diesem Verfahren wachsen die CNTs durch thermische Zersetzung eines Kohlenwasserstoffes auf einem nanostrukturiertem festen Katalysator. Der Katalysator besteht aus MgO als Träger und wahlweise Fe, Co oder Ni als aktivem Katalysator. In Abhängigkeit von deren Größe und Konzentrationen können maßgeschneiderte CNTs vom single- bis zum multi-walled CNT synthetisiert werden. Das Produkt ist immer ein Filz, Geflecht von sehr ineinander verschlungenen CNTs. (Abb. 1).

Außerdem müssen die so hergestellten CNTs durch eine Wäsche, üblicherweise in HCl, vom Träger MgO befreit werden. Auch ist eine Entflechtung und damit eine gute Dispersion von diesem Material nur sehr schwer zu realisieren. Vorteilig ist in diesem Verfahren, dass a) hohe Ausbeuten erreicht und b) die Durchmesser (Anzahl der Hüllen) der Nanoröhren sehr gut und genau variiert werden können. Dadurch kann auch die BET-Oberfläche der CNT-Geflechte verändert werden. In situ- Dotierungen sind mit dieser Methode möglich.

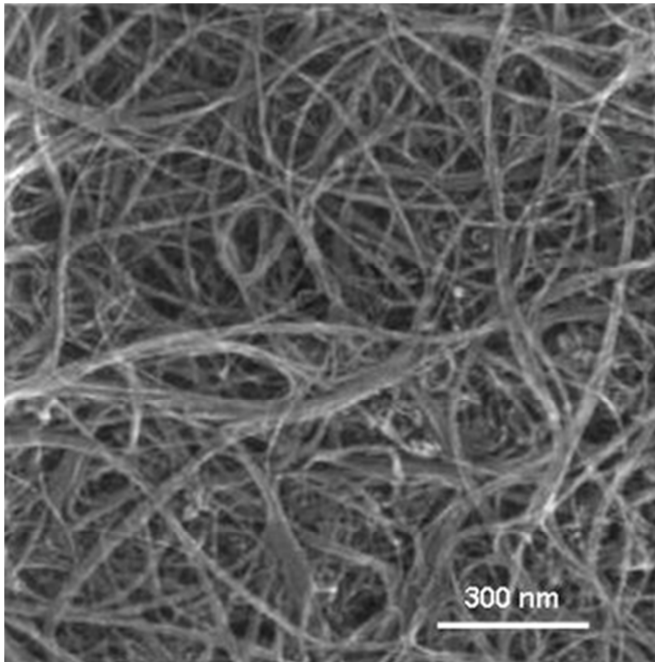


Abb. 1: Typisches CNT Geflecht, hergestellt mittels Festbett-Methode

- Floating-CVD- Verfahren

Im Gegensatz zum vorherigen Verfahren, werden hier die aktiven Katalysatoren Fe, Co oder Ni in Form von metallorganischen Verbindungen im Kohlenwasserstoff gelöst und dieser Precursor in den Reaktor direkt eingespritzt oder wie in unserem Verfahren durch ein durch Ultraschall erzeugtes Aerosol eingeleitet. Die Kohlenstoffnanoröhren wachsen in ausgerichteter Form an den Reaktorwänden auf, von denen sie leicht entfernt werden können. Abb. 2 zeigt ein solch charakteristisches Bündel ausgerichteter CNTs.

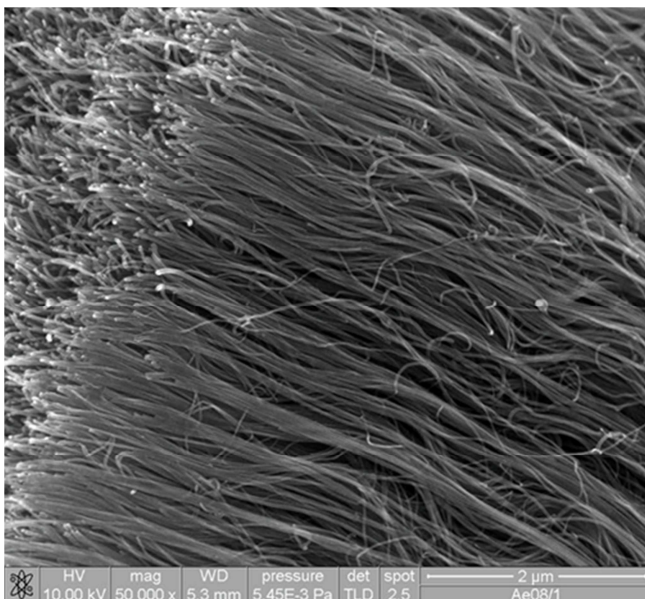


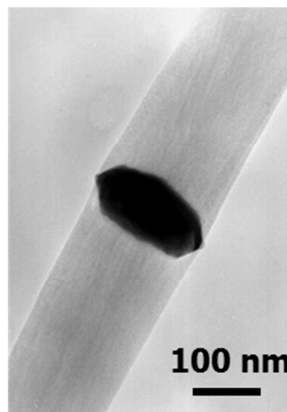
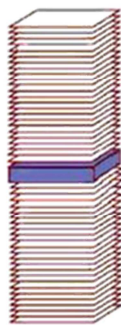
Abb. 2: Bündel gerichteter CNTs, hergestellt mittels Aerosol-CVD

Diese relativ gerade gewachsenen CNTs lassen sich sehr gut entbündeln (individualisieren), sind sehr rein und müssen dadurch nicht gereinigt werden. Nachteilig ist, dass der Durchmesser der Tubes relativ großen Schwankungen unterliegt und nur bedingt kontrollierbar ist. Die erzielbaren Ausbeuten sind so, dass größere Mengen im Gramm-Bereich herstellbar sind. In situ- Dotierungen, z. B. mit Stickstoff sind durch die Verwendung von stickstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen (Acetonitril) sehr gut möglich.

- Kohlenstoffnanofasern (herringbones, platelets)

Es sind zwei unterschiedlich strukturell aufgebaute Kohlenstoffnanofasern bekannt, die herringbones (Fischgräten) und platelets (Plättchen). Beide in Abb. 3 gezeigten Fasern stellen sogenannte offene Strukturen dar, d. h., sie sind an ihren Rändern offen, was hinsichtlich möglicher Speicherung oder Interkalation von Ionen/Molekülen sehr interessant erscheint. Innerhalb eines anderen BMBF- Projektes wurden für beide Faser-Typen optimale Herstellungsbedingungen ermittelt (Festbett-CVD). Durch die erzielte hohe Typenreinheit wurde es möglich, diese Nanofasern auch hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften (Oberfläche, Leitfähigkeit) zu charakterisieren.

platelet



herringbone

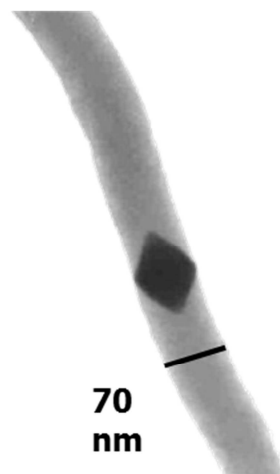


Abb. 3: Platelet- und herringbone-Typ von Kohlenstoffnanofasern.

1.2. Eigenschaften der Kohlenstoffnanostrukturen

Die synthetisierten „fixed-bed“ CNTs wurden in HCl gewaschen und anschließend im TEM/SEM vermessen und mittels BET-Methode (Wasserstoffabsorption) die freie BET-Oberfläche bestimmt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse. In dem CNT-Gemisch sind etwa 10 % ein- bzw. doppelwandige CNTs vorhanden, die den BET-Wert maßgeblich beeinflussen. Verschiedene Experimente zur Herstellung von stabilen wässrigen und organischen Dispersionen (mit verschiedenen Dispergatoren (z. B. PEG) und Ultraschall) führten bei diesen verzahnten Geflechten zu keiner befriedigenden Individualisierung der Tubes. Mehr als 50 % des Produktes blieb agglomeriert und war deshalb suboptimal für eine Einmischung in den Schlicker für das Elektrodenmaterial. Deshalb wurde auf einen Einsatz beim Projektpartner IKTS (hierzu waren größere Menge (150 g) notwendig) verzichtet.

Tabelle 1: Spezifikation der „fixed bed CNTs“

CNT-Typ	Synthese	Ø [nm]	Länge [µm]	BET [m ² /g]	N-Gehalt
MW(SW,DW)	Fixed bed	10-35	10-30	300	< 1 Ma%

Wie bereits unter 1.1. gezeigt, sind die „Aerosol-CNTs“ (Tabelle 2) ausgerichtete Bündel von MWCNTs, die sich leichter dispergieren lassen. Deshalb und wegen der durch die Stickstoffdotierung erreichten höchsten elektrischen Leitfähigkeit wurden von diesem Typ CNT 200 g im IFW synthetisiert und zur Elektrodenpräparation, Einbindung in den Schlicker an das IKTS geliefert. Über die elektrochemischen Messungen (Kapazität) wird im Schlussbericht des IKTS detailliert berichtet. Es konnte ein positiver Effekt auf die Größe der Kapazität durch den CNT-Einbau nachgewiesen werden.

Tabelle2: Spezifikation der „Floating CNTs“ (Aerosol)

CNT-Typ	Synthese	Ø [nm]	Länge [µm]	BET [m ² /g]	N-Gehalt
MW	Aerosol	10-35	~ 20	180	4–11Ma%

Die Spezifikation der „platelet“-Nanofasern ist in Tabelle 3 zu sehen. Obwohl diese nur eine verhältnismäßig geringe elektrische Leitfähigkeit besitzen (siehe Abb. 4) wurden davon etwa 25 g produziert (Reinheit > 90 %) und für Kapazitätsmessungen dem Projektpartner zur Verfügung gestellt. Die etwa eine Größenordnung höhere Leitfähigkeit besitzenden herringbone-Nanofasern

können bis jetzt nur im mg-Bereich synthetisiert werden (sehr geringe Ausbeute)so dass keine für elektrochemische Untersuchungen ausreichende Menge zur Verfügung gestellt werden konnte.

Tabelle 3: Spezifikation der Kohlenstoffnanofasern „platelet“

CNF-Typ	Synthese	ø [nm]	Länge [μm]	BET [m ² /g]	N- Gehalt
platelet	Festbett	70-500	≥ 20	70-100	< 1Ma%

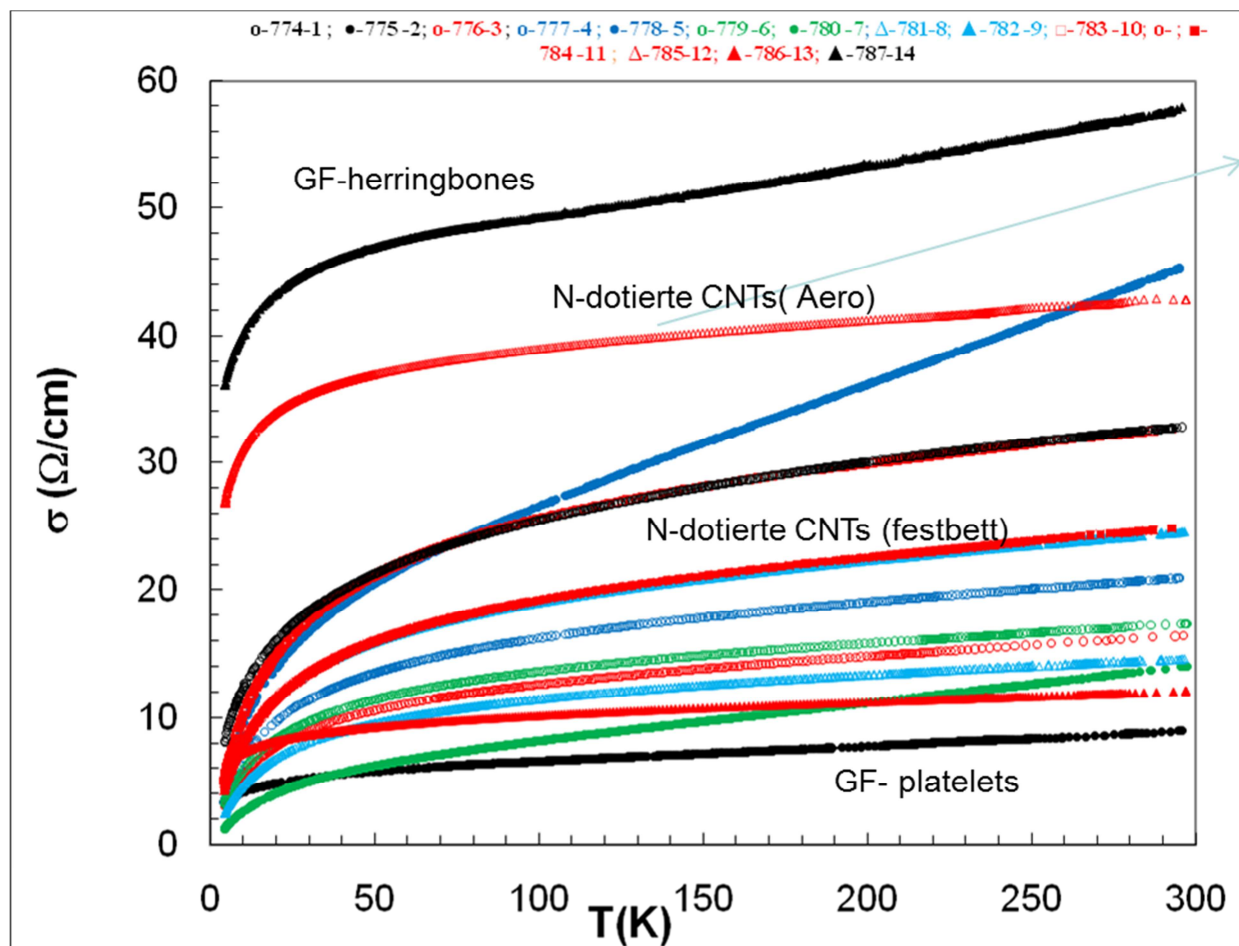


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit verschiedener Kohlenstoffnanoröhren und -fasern (Vierpunktmethode)

In Abb. 4 sind die elektrischen Leitfähigkeiten einer Reihe von CNT/CNF-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Die Ergebnisse wurden erzielt an CNT-Presslingen unter Druck mittels einer Vierpunkt-Messeinrichtung. Von den CNTs zeigen die höchsten Werte die „Aerosol-CNTs“ mit Stickstoffdotierung. Interessant sind die großen Unterschiede zwischen den beiden Nanofasern, die sich durch den strukturellen Aufbau aber leicht erklären lassen. Während herringbones durch die Fischgrätenstruktur entlang der Faserachse eine relativ hohe Leitfähigkeit besitzen, sind platelets

entlang der Faserachse Isolatoren, so dass die resultierende Leitfähigkeit im Pulvermaterial relativ gering ist.

Insgesamt muss jedoch festgestellt werden, dass die hier festgestellten Leitfähigkeiten 3 - 4 Größenordnungen unter den Werten, die an einzelnen Nanoröhren (104 S/cm) gemessen wurden, liegen, jedoch aber höher sind als die für klassische Ruß-Elektroden angegebenen 0,02 - 0,1 S/cm.

1.3. Lieferungen an CNTs und Nanofasern für die Herstellung von Elektrodenmaterial im FhG IKTS Dresden

Entsprechend den Projektaufgaben wurden die oben beschriebenen Nanostrukturen in größeren Mengen hergestellt und dem Projektpartner zum Einbau in das Schlickermaterial zur Verfügung gestellt.

1. Insgesamt 200 g MWCNTs entsprechend Tabelle 2
Diese MWCNTs konnten über das Aerosolverfahren in diesen Größenordnungen synthetisiert werden. Durch die Stickstoffdotierung konnte die elektrische Leitfähigkeit maximiert werden. Ebenfalls ließen sich diese MWCNTs in Aceton gut suspendieren, so dass ein Einbringen in den Schlicker möglich wurde. Die in Tab. 1 gezeigten CNTs mittels „Fixed bed Methode“ zeigen auf Grund der Verfilzung eine schlechte Dispergierbarkeit und somit eine schlechte Verarbeitbarkeit. Deshalb wurde auf eine Lieferung dieser CNTs verzichtet.
2. 24 g platelets als Zusatz entsprechend Tabelle 3
Für Testzwecke wurden diese Nanofasern geliefert, obwohl ihre elektrische Leitfähigkeit niedrig ist. Die diesbezüglich geeigneteren herringbones konnten aber auf Grund extrem geringer Wachstumsraten nicht in der g-Menge hergestellt werden.
3. 18 g MWCNTs aus der Tabelle 2
Diese MWCNTs wurden durch Säurebehandlung so funktionalisiert, dass zumindest die Enden der CNTs geöffnet wurden. Ziel sollte die Vergrößerung der freien Oberfläche der CNT sein.

Über die erzielten Elektrodeneigenschaften mit diesen speziellen CNTs/Fasern wird vom Projektpartner IKTS berichtet und ist nicht Gegenstand dieses Schlussberichtes.

1.4. Zusätzliche Arbeiten im IFW

Neben der Elektrodenkonstruktion über das Einbetten von CNTs in Schlickermaterialien und deren Aufbringung auf entsprechende Aluminium-Folien als Paste, sollte eine direkte Abscheidung der CNTs auf Aluminium-Folien und deren Ausrichtung für die Ionenleitung innerhalb der Elektrode von großen Vorteil sein, wie neuere Arbeiten zum wiederholten Male zeigen konnten [9]. Deshalb wurden im IFW zusätzlich Untersuchungen zur Abscheidung von CNTs auf Aluminiumfolie vorgenommen. Dabei bestand die Herausforderung, bei relativ niedrigen Temperaturen die CNTs gerichtet auf Alu-Folie abzuscheiden (Temperaturen unter Schmelzpunkt des Aluminiums 660 °C).

Innerhalb des Projektes wurden Darstellungsbedingungen für die Abscheidung von gerichtet gewachsenen MWCNTs mit folgenden Eigenschaften ermittelt:

- Durchmesser 10 nm
- Längen bis 50 μm (gerichtetes Wachstum)
- Oberflächendichten auf Al: $\sim 0,45 \text{ mg/cm}^2$, was einer Anzahl von ca. 2700 CNTs pro cm^2 entspricht

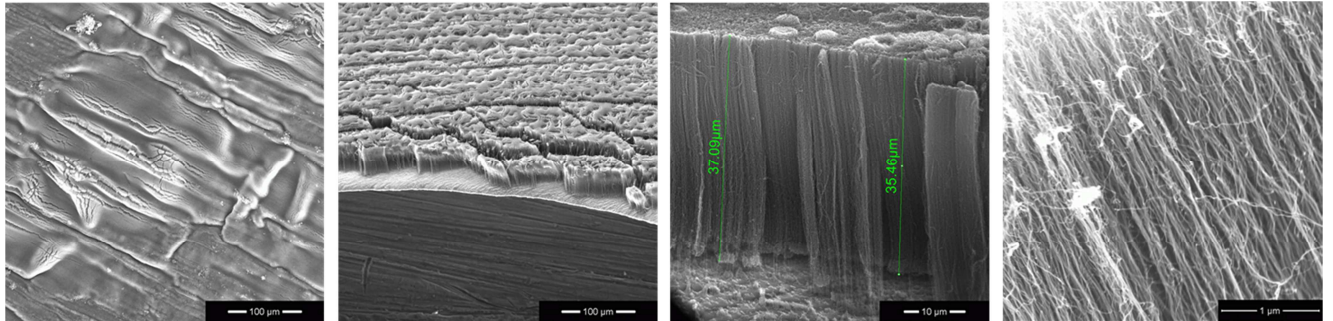


Abb. 5: SEM-Bilder von Ober- und Bruchfläche von MWCNTs auf Aluminiumfolie

In Abb. 5 sind typische SEM- Bilder von diesen MWCNTs zu sehen. Man erkennt deutlich die strenge Ausrichtung der Tubes, aber auch gleichzeitig das noch nicht gelöste Problem der Delaminationen der CNTs von der Folie. Verursacht wird dieses Phänomen durch die extrem starken Unterschiede im Ausdehnungskoeffizienten der Folie und der CNTs. Gegenwärtig laufen Untersuchungen, durch geeignete Zwischenschichten das Problem zumindest zu mindern. Auch kann das Wachstum der CNTs stark durch die Auswahl der Katalystoren beeinflusst werden. Durch eine „drop coating“-Methode wurden eine Reihe von Katalysatoren getestet (z. B. $\text{Fe/Al}_2\text{O}_3$; $\text{Co/Al}_2\text{O}_3$; $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$). Interessant erscheinen die Katalysatoren zu sein, die MnO (Fe/MnO , Ni/MnO , Co/MnO) als Trägermaterial verwenden. Dieses Oxid befördert das CNT-Wachstum. Die Untersuchungen sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Innerhalb des Projektes hat das IFW Dresden dem Projektpartner IKTS Dresden eine Reihe von beschichteten Aluminiumfolien (etwa 1 cm^2) mit unterschiedlichen CNT- Flächendichten (zwischen $0,17$ und $0,69 \text{ mg/cm}^2$) zu elektrochemischen Untersuchungen bereitgestellt. Über die Ergebnisse wird in deren Schlussbericht diskutiert.

2. Zusammenfassung, Einschätzung und Möglichkeiten der Verwertung der Ergebnisse

Das IFW hat mit zwei unterschiedlichen CVD-Methoden maßgeschneiderte CNTs für die Konstruktion von Elektroden für Superkondensatoren geliefert. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Nanostrukturen zur Verbesserung der Kondensatoren-Kenngrößen führen. Zusätzlich wurden MWCNTs direkt und ausgerichtet auf Aluminiumfolien abgeschieden. Diese Technologie könnte, bei erfolgreicher Skalierung, weit ökonomischer und effizienter sein und damit auch kostensparend.

Im gesamten Verbundprojekt konnte nachgewiesen werden, dass mit der hier verwendeten Wickel-Technologie „electrochemical double-layer capacitors (EDLC) hoher Leistungsdichte hergestellt werden können. Der positive Einfluss von CNTs auf die Elektrodeneneigenschaften konnte demonstriert werden. Zusätzlich zum Projekt wurde eine CVD-Route für die Abscheidung von gerichteten MWCNTs auf Aluminium- Folie erarbeitet, wobei die Ausrichtung der CNTs positiven Einfluss auf die Ionenbeweglichkeit im Elektrodenmaterial nimmt. Eine direkte industrielle Verwertung der gesamten Ergebnisse liegt in voller Verantwortung und Entscheidung der Brandenburgischen

Kondensatorenwerke Prenzlau. Mit dem von uns mit neuen Herausforderungen versehenen neuen Projektfolgeantrag und dessen Unterstützung durch das BMBF wird eine industrielle Umsetzung wahrscheinlicher und risikomindernd.

3. **Veröffentlichungen**

Folgende Publikationen sind im Förderzeitraum gemeinsam mit dem Projektpartner entstanden bzw. sind geplant:

1. V.O. Khavrus, M. Weiser, M. Fritsch, R. Ummethala, M. G. Salvaggio, M. Schneider,

M. Kusnezoff, A. Leonhardt "Application of Carbon Nanotubes Directly Grown on Aluminum Foils as Electric Double-Layer Capacitor Electrodes", in Chem.

Vap. Deposition (accepted)

2. R. Ummethala, V. O. Khavrus, A. Leonhardt, B. Büchner, J. Eckert „A comparative study of different supported catalysts on the growth of aligned carbon nanotube forests on aluminum foils”, in “Chem. Vap. Deposition” (under revision)

3. V.O. Khavrus, A. Leonhardt, J. Schumann, R. Kaltoven, S. Oswald, B. Büchner, “Growth of CNTs carpets on substrates with different oxide interlayers – a comparative study”, NT10: Eleventh International Conference on the Science and Application of Nanotubes; June 27 to July 2, 2010; Montréal, Québec, Canada;

4. V. Khavrus, M. Weiser, M. Fritsch, R. Ummethala, M. G. Salvaggio, M. Schneider, M. Kusnezoff, A. Leonhardt, “CCVD Of Aligned Carbon Nanotubes On Aluminium Foils And Their Tests As Components Of Supercapacitors ”, NT11: 12th International Conference on the Science and Application of Nanotubes; 10th-16th July, 2011; Cambridge, United Kingdom