

Rüdiger Klingeler, Christian Kramberger, Christian Müller,
Thomas Pichler, Albrecht Leonhardt und Bernd Büchner

Funktionalisierte Kohlenstoffnanoröhren: Materialforschung in der Nanowelt

1 Einleitung

Kohlenstoff bildet die Grundlage biologischer Prozesse und damit des Lebens selbst. Seine hohe Wandlungsfähigkeit und Vielfältigkeit verdankt es seiner speziellen Position im Periodensystem der Elemente als erstes Element der vierten Hauptgruppe. In reiner Form kann es zum Beispiel als Graphit, Diamant, Fulleren oder als Kohlenstoffnanoröhre [1] vorliegen (Bild 1). Nur im Diamanten bilden die Kohlenstoffatome eine dreidimensionale, sehr fest kovalent gebundene Struktur – die charakteristische „Diamantstruktur“ (sp^3 -Hybridisierung der C-Atome). In den anderen genannten Kohlenstoffallotropen liegen anstelle der vier tetragonal angeordneten starren Bindungen des Diamantgitters lediglich drei Bindungen (vorwiegend sp^2 -Hybridisierung) in einer Ebene vor. Durch die Existenz dreier Nachbaratome wird in dieser Ebene eine hexagonale Ordnung gebildet, wie sie in ähnlicher Weise zum Beispiel auch Bienenwaben zeigen. Im Gegensatz zum starren Diamantgitter lassen sich die flexiblen einzelnen Graphitschichten krümmen und sogar zu einem Zylinder formen. Diese „aufgerollte“ Allotropie des Kohlenstoffes bezeichnet man als Kohlenstoffnanoröhren. Sie sind genau wie Graphit chemisch sehr stabil und widerstehen praktisch jeder chemischen Einwirkung, sofern sie nicht gleichzeitig hohen Temperaturen und Sauerstoff ausgesetzt werden.

Graphitschichten lassen sich mit unterschiedlichem Krümmungsradius aufrollen, sodass unterschiedliche Kohlenstoffnanoröhren mit verschiedenen Radien entstehen. Auch die Richtung des Aufrollens ist entscheidend, wobei – wie in Bild 2 veran-

schaulicht – jeder Aufrollvektor eine eigene Modifikation der Nanoröhren bedingt. Dies wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass die Krümmung nicht beliebig groß werden kann: Die dünnsten beobachteten Nanoröhren besitzen einen Durchmesser von 0,4 nm. Im Bereich großer Radien gibt es hingegen praktisch keine Einschränkung, da in diesem Fall mehrere einwandige Nanoröhren konzentrisch ineinander geschachtelt und somit stabilisiert werden. Solche mehrwandigen Nanoröhren können bis zu 100 nm dick werden. Dabei kann der Innendurchmesser der Röhre fast beliebig variieren, und auch die Länge kennt keine grundsätzlichen Einschränkungen, wobei typische Längen im Bereich von 100 nm bis zu 1 mm liegen.

Neben der Struktur selbst lassen sich auch andere physikalische Eigenschaften der Nanoröhren auf das Graphit-Hexagon zurückführen [2, 3]. Obwohl die einzelnen Schichten im Graphit sehr leicht gegeneinander verschoben werden können und es daher zum Schreiben oder als Schmiermittel verwendet werden kann, ist Graphit in der Ebene aufgrund der sehr starken Bindungen zwischen den Kohlenstoffatomen und der daraus resultierenden Bienenwabenstruktur das stabilste denkbare Material (Tabelle 1). Diese Stabilität bleibt auch nach dem Aufrollen der Ebenen zu Nanoröhren vorhanden, sodass diese Kohlenstoffallotropie durch ihre geringe Dichte ein sehr großes Anwendungspotenzial, zum Beispiel im Leichtbau von Hochleistungsverbundwerkstoffen, besitzt. In Bezug auf seine elektrischen Eigenschaften ist Graphit eine Mischung aus Halbleiter und Metall mit einer Fermioberfläche aus sechs Fermipunkten und einer linearen kegelförmigen Dispersion. Graphit bildet deswegen auch selbst

Außergewöhnliche Materialeigenschaften machen Kohlenstoffnanoröhren zu einem vielseitigen nanoskaligen Werkstoff. Füllt man sie zum Beispiel mit metallischen oder ferromagnetischen Materialien, so ergeben sich durch eine Kohlenstoffhülle geschützte „Nanokabel“ oder Nano-Magnete. Neben verschiedenen Syntheseverfahren wie der Laserablation und der Chemischen Gasphasenabscheidung werden grundlegende physikalische Eigenschaften sowie Anwendungen in der Messtechnik und in der Medizin vorgestellt. In der Magnetkraftmikroskopie versprechen magnetisch gefüllte Kohlenstoffnanoröhren eine hohe laterale Auflösung bei gleichzeitigem Schutz des magnetischen Messensors durch die Außenhülle. Im Bereich der biomedizinischen Anwendungen stellen Kohlenstoffnanoröhren ein nanoskaliges Transportmedium dar, das zum Transfer von Funktionsmaterialien in einzelne Zellen, zum Beispiel für magnetische Sensorik oder für Medikamententransporte, angewendet werden kann.

Thanks to their extraordinary properties, carbon nanotubes reveal a promising potential for applications on the nanometre scale. When filled with metals or ferromagnets, nano-wires and magnets with a protecting carbon shell are realised. Different synthesis routes are described, such as laser ablation and chemical vapour deposition. Probes for magnetic force microscopy based on iron-filled carbon nanotubes are presented, and demonstrate a high spatial resolution, with the carbon shells at the same time providing effective wear resistance. We show also the potential of carbon nanotubes for biomedical applications, in particular their suitability as magnetic nano-heaters, drug-carrier systems or sensors for diagnostic and therapeutic usage on the cellular level.

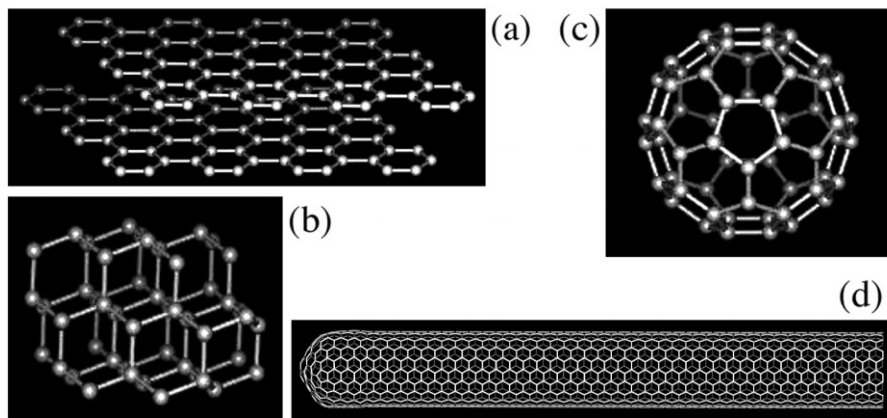


Bild 1. Vier allotrope Formen von Kohlenstoff: (a) Graphit, (b) Diamant, (c) Fullere und (d) Kohlenstoffnanoröhren

ein hochaktuelles Forschungsgebiet in der nanoskaligen Elektronik. Zwar existieren in Graphit einige Leitungselektronen, diese können aber nur diskrete Impulse annehmen und sich somit nicht wie in einem konventionellen Metall weitgehend frei bewegen. Die elektronischen Eigenschaften der einwandigen Nanoröhren spiegeln dies insofern wider, als dass sowohl halbleitende als auch metallische Nanoröhren existieren, je nach Aufrollvektor der Graphitschichten. Dies ist auf die geänderten Randbedingungen für die Impulse aller Elektronen zurückzuführen: In geschlossenen Nanoröhren sind nur bestimmte Impulszustände erlaubt, d. h. nur diejenigen Elektronenimpulse, die mit dem Umfang kommensurabel sind. In einem Drittel der Nanoröhren sind metallische Elektronen vorhanden – hier ist die diskrete Beschränkung aufgehoben. Bei allen anderen Aufrollvektoren sind keine metallischen Zustände möglich und die betreffenden Nanoröhren zeigen ein halbleitendes Verhalten. Hierbei weisen die dünnsten Nanoröhren die ausgeprägtesten Eigenschaften auf, da sich diese – im Vergleich zu dickeren Nanoröhren mit geringerer Krümmung – am deutlichsten von herkömmlichem Graphit unterscheiden. Halbleitende und metallische Zylinderlagen sind auch in mehrwandigen Nanotubes prinzipiell vorhanden, aber die metallischen Anteile bestimmen weitestgehend das Verhalten des gesamten Systems.

Nicht nur die Eigenschaften der Außenhülle von Kohlenstoffnanoröhren sind Gegenstand der aktuellen Forschung, sondern auch die Funktionalisierung des zunächst leeren Innenraumes durch die Füllung der Nanoröhren mit verschiedenen Materialien ist von großem Interesse für die materialbasierte Grundlagenforschung und eröffnet neue Möglichkeiten für nanotechnologische Anwendungen. Solche Füllmaterialien sind naturgemäß bereits „intrinsisch“ nanoskalig, da ihre Form durch die Kohlenstoffhülle vorgegeben wird. Zudem befinden sich diese Materialien in einer

Kohlenstoffhülle, d. h. in einem uniformen und extrem korrosionsbeständigen Nanocontainer mit chemisch inerten Wänden, der sie separiert und von den Umgebung abschirmt [4]. In dieser abgeschlossenen Umgebung können daher zum Beispiel ungewöhnliche Hochdruckphasen oder lineare Ketten von Molekülen stabilisiert und untersucht werden, wie es im freien Raum nicht denkbar wäre.

2 Herstellung, Funktionalisierung und Analyse der grundlegenden Eigenschaften

Die Herstellung von Kohlenstoffnanoröhren stützt sich auf drei Verfahren – Bogenentladung, Laserablation und Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) [4 bis 6]. Die beiden letztgenannten Synthesewege werden sowohl am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) Dresden als auch in enger Kooperation mit der Technischen Universität Dresden praktiziert.

Generell nutzen alle genannten Syntheseverfahren Metalle als Katalysatoren. Sehr gut geeignet sind Übergangsmetalle, wie zum Beispiel Eisen, Kobalt und Nickel, denn diese begünstigen Keimbildung und Wachstum von röhrenförmigen Strukturen [7, 8]. Die Größe der Katalysatorpartikel bestimmt dabei den Durchmesser der Nanoröhren und damit auch die Anzahl der Graphitebenen in deren Hülle. Die Metalle können mit festen Kohlenstoffquellen vermischt und zu Tabletten gepresst werden (Laserablation) oder auf einem Substrat in Form von Nanoclustern abgeschieden werden, wie es bei der CVD häufig der Fall ist.

Bei der Laserablation befindet sich das Ausgangsmaterial (Target) in einem beheizten Rohrofen (ca. 1200 °C) und wird mit einem Laser (z. B. Nd-YAP-Laser) zum Verdampfen angeregt. Aufgrund der hohen Temperatur (3000

	Kohlenstoffnanoröhren	Vergleichsmaterial
Elastizitätsmodul	≈ 1 Tpa	Diamant ≈ 1 Tpa
Zugfestigkeit	≈ 30 GPa	Stahl ≈ 0.7 GPa
Dichte	≈ 1300 Kg/m ³	Stahl ≈ 8000 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	≈ 2000 W/mK	Kupfer ≈ 400 W/mK
Kritische Stromdichte	1x10 ⁹ A/cm ²	Kupfer ≈ 500 A/cm ²

Tabelle 1
Physikalische Eigenschaften von Nanoröhren im Vergleich zu traditionellen Hochleistungsmaterialien der jeweiligen Kategorie

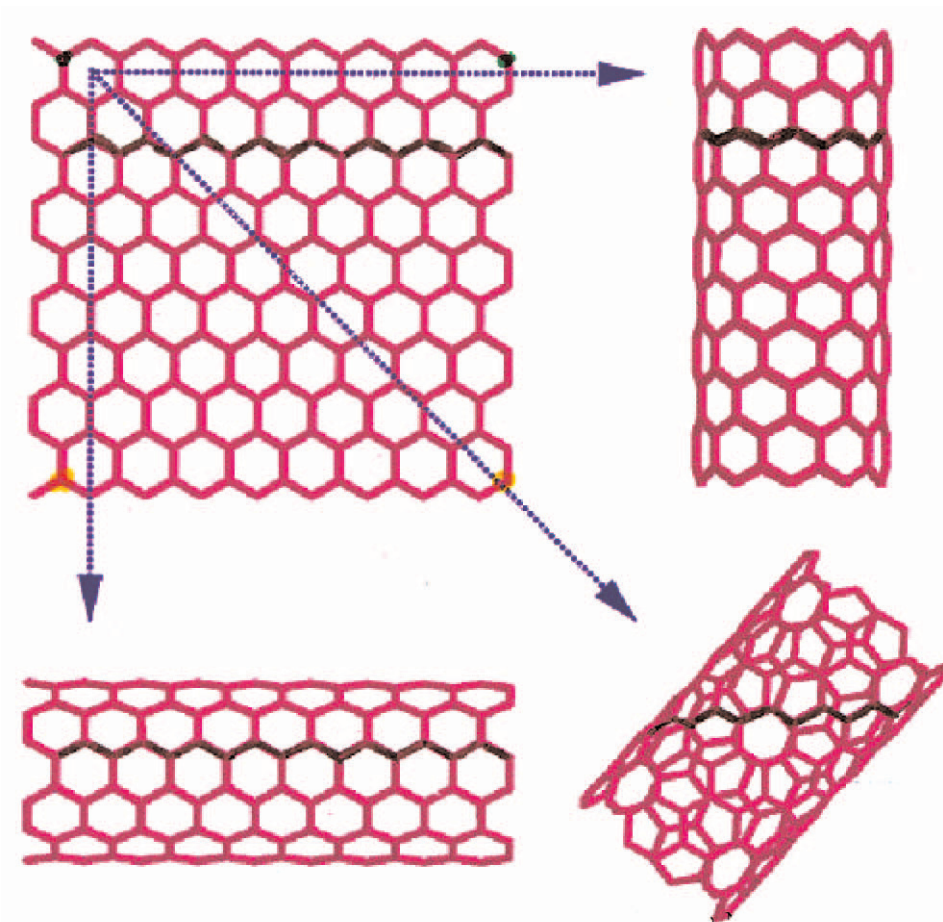


Bild 2. Schematische Darstellung zum Aufrollen von Nanoröhren. Je nach Aufrollvektor findet sich die schwarze Linie entweder als Umfang, als Schraube oder als gerade Linie längs der Achse wieder.

bis 4000 °C), die sich im Bereich des Schmelzpunktes von Graphit bewegt, bilden sich bei diesem Vorgang Atome und Atomcluster, die zu Nanopartikeln kondensieren und aus denen Nanoröhren wachsen können. Die Laserablation eignet sich besonders für die Herstellung von einwandigen und dünnen mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren mit hoher Kristallinität und in guter Ausbeute und erlaubt aufgrund der effektiven Prozesskontrolle eine detaillierte Analyse des Syntheseprozesses [9].

Die CVD von Kohlenstoffnanoröhren ist ein zweistufiger Prozess, welcher sich aus der Präparation des Katalysators (z. B. Metallpartikel auf Aluminiumoxid) und der Synthese der Nanoröhren zusammensetzt. Zum Wachstum der Nanoröhren auf dem Katalysator-Trägermaterial ist aktivierter Kohlenstoff (Cluster, Moleküle) notwendig. Diese aktivierten Spezies können thermisch (ca. 500 bis 1000 °C) oder im Plasma aus flüchtigen organischen Verbindungen (meist Kohlenwasserstoffe oder Alkohole) erzeugt werden. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, Nanoröhren aus metallorganischen Verbindungen, d. h. aus Molekülen, die sowohl Kohlenstoff als auch den Katalysator enthalten (z. B. Metallocene), herzustellen [8]. Die Vorteile des CVD-Verfahrens liegen in der guten Skalierbarkeit und Anpassung an den jeweiligen Anwendungszweck. Die so hergestellten Proben werden am IFW gezielt funktionalisiert und bezüglich ihrer Eigenschaften analysiert. Besonders wichtig haben sich hierzu die optische Spektroskopie [10], die Ramanspektroskopie [5] sowie die Hochenergiespektroskopie [11] erwiesen. Exemplarisch hat sich als wesentliche Funktionalisierung das Füllen von Nanoröhren mit Metallen

[8], mit organischen Molekülen bzw. Fullerenen („Peapods“) [12], sowie die Dotierung durch Interkalation [11], d. h. die Einlagerung von Atomen zwischen die Graphitschichten, herausgestellt. Dies erlaubte es zum Beispiel erstmals, den Übergang von einem eindimensionalen metallischen Verhalten zu einer normalen Fermiflüssigkeit anhand von mit Alkalimetall dotierten Nanoröhren experimentell zu verifizieren [11].

3 Anwendungen

Die außergewöhnlichen Materialeigenschaften von Kohlenstoffnanoröhren und ihren Modifikationen machen sie zu einem vielseitigen Werkstoff, der bereits eine intrinsische Nanoskaligkeit aufweist. Ein Schwerpunkt des IFW Dresden ist die Herstellung metallisch bzw. ferromagnetisch gefüllter Kohlenstoffnanoröhren. Die einzelnen Nanoröhren sind dabei mit Gold, Kupfer, Eisen, Kobalt oder Nickeldrähten gefüllt. Die Metalle bilden somit „Nano-Kabel“ im Inneren der Nanoröhren, die durch die Kohlenstoffhülle voneinander und von der Außenwelt isoliert und beispielsweise gegen Oxidation geschützt sind. Ist das Füllmaterial zudem ferromagnetisch, so entsteht ein Nanomagnet in einer Kohlenstoff-Schutzhülle [14]. Für jede dieser Funktionalisierungsmöglichkeiten werden am IFW neben den grundlegenden physikalischen Eigenschaften auch mögliche Anwendungen untersucht und entwickelt, beispielsweise für die Nano-Messtechnik und für den Einsatz von Nanomaterialien in der Medizin.

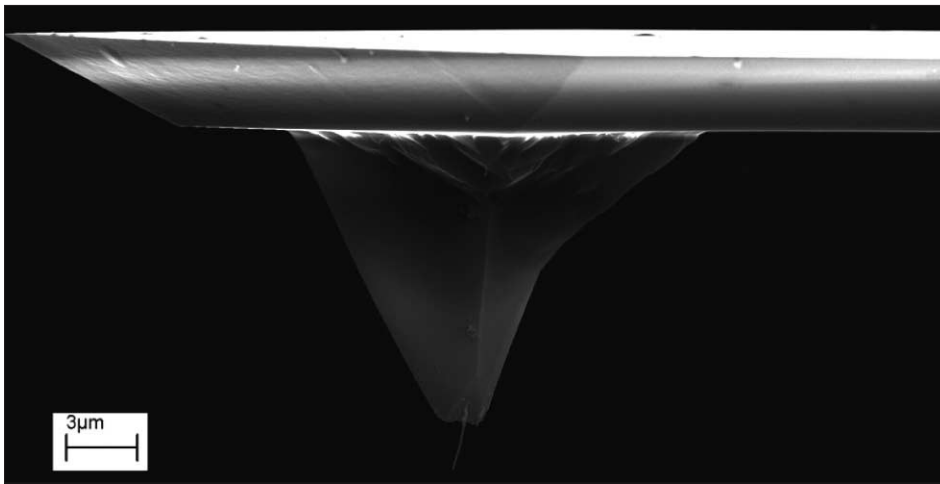


Bild 3. Ferromagnetisch gefüllte Kohlenstoffnanoröhre an der Spitze eines konventionellen Raster-sondenmikroskopie-Probenkopfes als Realisierung einer MFM-Messspitze [15]

3.1 Magnetkraftmikroskopie

In der Magnetkraftmikroskopie (MFM – magnetic force microscopy) können die magnetischen Eigenschaften von nanoskaligen Magneten untersucht werden. Diese Methode verwendet einen schwingenden „Cantilever“, d. h. eine an einer Feder schwingende Messspitze, die man sich wie ein schwingendes Sprungbrett vorstellen könnte. Besitzt ein Cantilever eine magnetische Hülle und führt man diese magnetische Messspitze über ein magnetisches Material, dann verändert sich die Frequenz der Schwingung und erlaubt so die Messung der magnetischen Eigenschaften. Je dünner die magnetische Spitze ist, desto besser wird im Prinzip die Auflösung eines MFM. Ein Nachteil konventioneller magnetischer Spitzen ist allerdings ihre kurze

Lebensdauer durch Oxidation und sonstige Schädigung der magnetischen Hülle. Anstelle konventioneller MFM-Spitzen können jedoch die speziellen Eigenschaften magnetisch gefüllter Kohlenstoffnanoröhren für verbesserte Messsysteme verwendet werden. Bild 3 zeigt eine solche am IFW hergestellte Spitze [15]. Die ferromagnetische Füllung – in diesem Fall Eisen – liegt als Nanodraht vor, dessen Durchmesser (einige Nanometer) mindestens 1000-mal kleiner als seine Länge ist und der daher nahezu perfekt eine dünne MFM-Spitze bildet. Ein zweiter Vorteil bei der in Bild 3 gezeigten MFM-Spitze ist die Tatsache, dass der Nanomagnet durch die Kohlenstoffhülle sehr gut gegen äußere Einflüsse geschützt ist und die Messspitze daher eine sehr hohe chemische Stabilität besitzt.

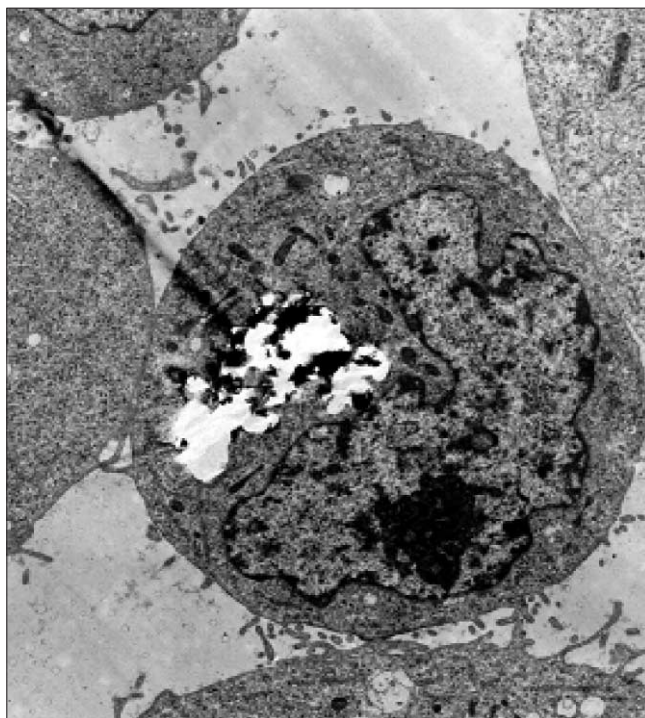


Bild 4. Transmissionselektronenmikroskopie-Aufnahme von ferromagnetisch gefüllten Kohlenstoffnanoröhren im Inneren menschlicher Harnblasenkarzinomzellen (Zelllinie EJ28) [24]

3.2 Biomedizinische Anwendungen – haben Zellen Fieber?

Die Existenz eines befüllbaren und stabilen Kohlenstoff-„Nano-Containers“ eröffnet die Möglichkeit neuartiger biomedizinischer Anwendungen. Dabei werden durch den Einsatz nanotechnologischer Methoden Verfahren der Diagnose auf Zellebene, in magnetischen Bildgebungsverfahren und in der medizinischen Therapie (z. B. als Medium zum Medikamententransport in einzelne Zellen) entwickelt. Die Untersuchung dieser Verfahren erfolgt in einer Zusammenarbeit des IFW mit dem Universitätsklinikum der TU Dresden (mit dem Fokus im Bereich der Tumorbekämpfung), dem Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik Dresden sowie im Rahmen des vom IFW koordinierten europäischen Netzwerkes CARBIO, das durch die EU in den nächsten vier Jahren durch ca. 3 Mio. Euro unterstützt wird.¹

Die Forschungsarbeiten des IFW im Bereich der biomedizinischen Anwendungen basieren auf der Möglichkeit, Kohlenstoffnanoröhren an ihren Außenwänden zu „biofunktionalisieren“, also so zu modifizieren, dass sie mit biologischen Systemen kompatibel gemacht und gezielt in einzelne lebende Zellen „eingeschleust“ werden können. Funktionalisierte Nanoröhren können die Zellmembran durchdringen und sich im Zytoplasma anreichern, ohne dass starke toxische Effekte zu beobachten wären [16]. Dies wurde am IFW zusammen mit der TU Dresden bereits

¹ www.CARBIO.eu

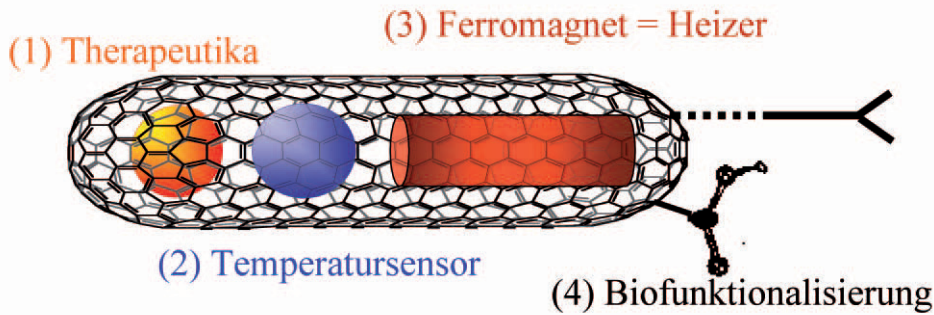


Bild 5. Schematische Darstellung funktionalisierter Kohlenstoffnanoröhren mit verschiedenen Funktionsmaterialien im Inneren des Nano-Containers – als Beispiel sind ein Ferromagnet als Heizer, ein Temperatursensor und ein Therapeutikum dargestellt – und einer biofunktionalisierten Außenhülle

erfolgreich an menschlichen Krebszellen gezeigt (Bild 4) [17]. Darüber hinaus können spezifische Antigene oder funktionale Gruppen an die Hülle geheftet werden, welche die Kopplung der Nanoröhren an besondere Zelltypen – zum Beispiel Krebszellen – erlauben [18]. Damit sind Kohlenstoffnanoröhren ein nanoskaliges Transportmedium, das für den Transfer von Funktionsmaterialien, d. h. Sensoren, Heizern oder Medikamenten, in einzelne Zellen verwendet werden kann (schematische Darstellung in Bild 5). Ein Anwendungsbeispiel ist die Füllung mit ferromagnetischem Eisen. In diesem Fall führt ein äußeres alternierendes Magnetfeld durch die auftretenden Dissipationseffekte zu einem Aufheizen der Magnete, sodass diese als „Nano-Heizer“ verwendet werden können [19]. Transferiert man diese nun in Krebszellen, bietet sich die Möglichkeit, die Zellen kontaktfrei zu erhitzen und ohne Schädigung des gesunden Gewebes durch die Methode der Hyperthermie zu zerstören. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind der Transport von Therapeutika und Sensoren in erkrankte Zellen. Als Modell für den Transport von Therapeutika wurde am IFW bereits gezeigt, dass leere Kohlenstoffnanoröhren geöffnet, mit einem Zytostatikum² (Carboplatin) gefüllt und wieder verschlossen werden können. Der Einsatz als Sensor wird am Beispiel des am IFW realisierten Nano-Thermometers deutlich: Ein solches Nano-Thermometer entsteht, wenn eine Substanz mit einem stark temperaturabhängigen kernmagnetischen Resonanzsignal – am IFW wurde dazu Kupferiodid verwendet – in eine Nanoröhre gefüllt wird, sodass nach deren Transfer in eine Zelle eine genaue Temperaturbestimmung durch nicht-invasive Magnetresonanz-Spektroskopie erfolgen kann [20]. Aufgrund der schützenden Kohlenstoffhülle können dazu diverse, eigentlich toxische Materialien verwendet werden, ohne dass starke Nebenwirkungen zu erwarten sind. Die genannten Beispiele deuten bereits die Vielfalt der möglichen biomedizinischen Anwendungen an. Die einzelnen Funktionalitäten können dabei auch kombiniert werden, da verschiedene Materialien gleichzeitig in eine Kohlenstoffnanoröhre gefüllt werden können. So wird es denkbar, ferromagnetisch gefüllte Nanoröhren mit einem temperaturempfindlichen Verschluss zu versehen, diese in eine Zelle zu transferieren und dort durch das Heizen mit alternierenden Magnetfeldern zu öffnen, sodass letztlich ein ebenfalls in der Nanoröhre befindliches Therapeutikum freigesetzt wird.

Die biomedizinischen Anwendungen von Kohlenstoffnanoröhren werden am IFW und seinen Kooperations-

partnern interdisziplinär untersucht, da neben den materialwissenschaftlichen, chemischen und physikalischen Grundlagen die Wechselwirkungen mit biologischen Systemen erforscht werden müssen. Dabei stehen insbesondere die Reaktion des Immunsystems, mögliche toxischen Auswirkungen und letztlich die therapeutische und diagnostische Anwendung für die Realisierung neuartiger biomedizinischer Methoden im Vordergrund.

4 Zusammenfassung

Die Entdeckung von Kohlenstoffnanoröhren hat aufgrund ihrer einzigartigen und vielfältigen Eigenschaften eine Vielzahl an Arbeiten sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch in der angewandten Forschung nach sich gezogen. Kohlenstoffnanoröhren erschließen mit ihrer Größe nicht nur den Nanokosmos an der Grenze zwischen Chemie und Physik, sondern erlauben durch ihre Materialeigenschaften und ihre Funktionalisierbarkeit auch neuartige Anwendungen in der Nanoelektronik, der Verbundstofftechnik, der Nanobiotechnologie und der Medizin.

Literatur

- [1] Iijima, S.: Helical microtubules of graphitic carbon. In: Nature **354** (1991), S. 56
- [2] Mintmire, J. W.; Dunlap, B. I.; White, C. T.: In: Phys. Rev. Lett. **68** (1992), S. 631
- [3] Hamada, N.; Sawada, S.; Oshiyama, A.: In: Phys. Rev. Lett. **68** (1992), S. 1579
- [4] Leonhardt, A.; Ritschel, M.; Kozhuharova, R.; Graff, A.; Mühl, T.; Huhle, R.; Münch, I.; Elefant, D.; Schneider, C. M.: Synthesis and properties of filled carbon nanotubes. In: Diamond and Related Materials **12** (2003), S. 790
- [5] Dresselhaus, M. S.; Dresselhaus, G.; Avouris, P.: Carbon Nanotubes. Heidelberg: Springer, 2001
- [6] Chrisey, D. B.; Hubler, G. K.: Pulsed Laser Deposition of Thin Films. Wiley-VCH, 2003
- [7] Müller, Ch.; Hampel, S.; Elefant, D.; Biedermann, K.; Leonhardt, A.; Ritschel, M.; Büchner, B.: Iron filled carbon nanotubes grown on substrates with thin metal layers and their magnetic properties. In: Carbon **44** (2006), S. 1746
- [8] Hampel, S.; Leonhardt, A.; Selbmann, D.; Biedermann, K.; Elefant, D.; Müller, Ch.; Gemming, T.; Büchner, B.: Growth and characterisation of filled carbon nanotubes with ferromagnetic properties. In: Carbon **44** (2006), S. 2316
- [9] Rümmeli, M. H.; Borowiak-Palen, E.; Gemming, T.; Pichler, T.; Knupfer, M.; Kalbác, M.; Dunsch, L.; Jost, O.; Silva, S. R. P.; Pompe, W.; Büchner, B.: Novel catalysts, room temperature and the importance of oxygen for the synthesis of single wall carbon nanotubes. In: Nano Letters **5** (2005), S. 1209
- [10] Jost, O.; Gorbunov, A. A.; Pompe, W.; Pichler, T.; Friedlein, R.; Knupfer, M.; Reibold, M.; Bauer, H.-D.; Dunsch, L.; Golden, M. S.; Fink, J.: Diameter grouping in bulk samples of single-walled carbon nanotubes from optical absorption spectroscopy. In: Appl. Phys. Lett. **75** (1999), S. 2217
- [11] Rauf, H.; Pichler, T.; Knupfer, M.; Fink, J.; Kataura, H.: Transition from a Tomonaga-Luttinger-Liquid to a Fermi-Liquid in intercalated single wall carbon nanotube bundles. In: Phys. Rev. Lett. **93** (2004), S. 96805
- [12] Simon, F.; Kuzmany, H.; Rauf, H.; Pichler, T.; Bernardi, J.; Peterlik, H.; Korecz, L.; Fuellep, F.; Janossy, A.: Low temperature fullerene encapsulation in single wall carbon nanotubes: synthesis of N@C₆₀@SWCNT. In: Chem. Phys. Lett. **383** (2004), S. 362

² Zytostatika hemmen das Zellwachstum bzw. die Zellteilung und werden beispielsweise zur Antitumortherapie eingesetzt.

- [13] Pichler, T.; Kuzmany, H.; Kataura, H.; Achiba, Y.: Metallic polymers of C_{60} inside single-walled carbon nanotubes. In: Phys. Rev. Lett. **87** (2001), S. 267401
- [14] Mühl, T.; Elefant, D.; Graff, A.; Kozhuharova, R.; Leonhardt, A.; Mönch, I.; Ritschel, M.; Simon, P.; Groudeva-Zotova, S.; Schneider, C. M.: Magnetic properties of aligned Fe-filled Carbon nanotubes. In: J. Appl. Phys. **93** (2003), S. 7894
- [15] Winkler, A.; Mühl, T.; Menzel, S.; Kozhuharova-Koseva, R.; Hampel, S.; Leonhardt, A.; Büchner, B.: Magnetic force microscopy sensors using iron-filled carbon nanotubes. In: J. Appl. Phys. **99** (2006), S. 104905
- [16] Pantarotto, D.; Briand, J. P.; Prato, M.; Bianco, A.: Translocation of bioactive peptides across cell membranes by carbon nanotubes. In: Chem. Commun. **1** (2004), S. 16
- [17] Mönch, I.; Meye, A.; Leonhardt, A.; Krämer, K.; Kozhuharova, R.; Gemming, T.; Würth, M. P.; Büchner, B.: Ferromagnetic filled carbon nanotubes and nanoparticles: synthesis and lipid-mediated delivery into human tumor cells. In: J. Magn. Mat. **290-291** (2005), S. 276
- [18] Chen, X.; Un Chong Tam; Czlapinski, J. L.; Lee, G. S.; Rabuka, D.; Zettl, A.; Bertozzi, C. R.: In: J. Am. Chem. Soc. **128** (2006), S. 6292
- [19] Mönch, I.; Meye, A.; Leonhardt, A.: Ferromagnetic Filled Carbon Nanotubes as Novel and Potential Containers for Anticancer Treatment Strategies. In: Challa Kumar (Hrsg.): Nanotechnologies for the Life Sciences. Band 6: Nanomaterials for Cancer Therapy. Wiley-VCH, 2006
- [20] Klingeler, R.; Büchner, B.; Leonhardt, A.; Haase, J.; Meye, A.; Hammermann, G.: Particles for local temperature measurements in organic and non-organic matter. Patentanmeldung DE-OS 10 2005 005 704
- [21] Meye, A.; Mönch, I.; Leonhardt, A.: unveröffentlichte Daten

Manuskripteingang: 9.11.2006
 Angenommen am: 19.12.2006



Klingeler, Rüdiger

Dr. rer. nat.

Studium Physik von 1989 bis 1998 an der Universität zu Köln ♦ 2003 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V. ♦ seit 2006 Koordinator des Marie Curie Netzwerkes CARBIO (Carbon Nanotubes for biomedical applications)



Pichler, Thomas

Dr. rer. nat. habil.

Studium Physik von 1984 bis 1990 an der Universität Wien ♦ 1993 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 2002 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ seit 1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V. und seit 2002 Dozent am Institut für Materialphysik an der Universität Wien



Kramberger, Christian

Dipl.-Phys.

Studium Physik von 1997 bis 2004 an der Universität Wien ♦ 2004 Studienabschluss als Diplomphysiker ♦ seit 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V.



Leonhardt, Albrecht

Dr. rer. nat.

Studium Kristallographie von 1967 bis 1974 an der Karl-Marx-Universität Leipzig ♦ 1974 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 1992 Leiter der Abteilung für Chemische Gasphasenabscheidung am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V.



Müller, Christian

Dipl.-Chem.

Studium Chemie von 1998 bis 2003 an der TU Chemnitz ♦ 2003 Studienabschluss als Diplomchemiker ♦ seit 2004 Doktorand am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V.



Büchner, Bernd

Prof. Dr. rer. nat. habil.

Studium Physik von 1981 bis 1989 an der Universität zu Köln ♦ 1993 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1999 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ von 2000 bis 2003 Professor für Experimentelle Physik an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen ♦ seit 2003 Professor für Experimentelle Physik am Institut für Festkörperphysik, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden ♦ Direktor des Instituts für Festkörperforschung am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V.