



# Carbon Nanotubes – ein multifunktionaler Leichtbauwerkstoff für die Adaptronik

**Autoren:** *Hans P. Monner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Strukturmechanik, Braunschweig*

*Stefan Mühle, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Strukturmechanik, Braunschweig*

*Peter Wierach, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Strukturmechanik, Braunschweig*

*Johannes Riemenschneider, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Strukturmechanik, Braunschweig*

Die bekanntesten Erscheinungsformen von Kohlenstoff sind Graphit und Diamant. Mitte der 80er Jahre wurde von H. Kroto und R. Smalley eine dritte Variante einer Kohlenstoffstruktur entdeckt [9]. Deren Aufbau erinnert an die Kuppelbauten des amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller, woraufhin diese Kohlenstoffstrukturen als Fullerene bezeichnet wurden. In Japan beobachtete 1991 S. Iijima eine röhrenartige Kohlenstoffstruktur, die aus geschlossenen zylindrisch geformten Graphitebenen besteht [7]. Diese als Carbon-Nanotubes (CNT) bezeichneten Strukturen weisen einen Durchmesser von 1-10 nm auf und können unter kontrollierten Fertigungsprozessen eine Länge von einigen Mikrometern erreichen.

CNT weisen exzellente aktive Eigenschaften auf, die ein enormes Potenzial bei der Entwicklung von neuartigen Aktuatoren und deren Anwendungen erkennen lassen. CNT zählen außerdem zu den steifsten und festesten Materialien, die je hergestellt wurden. Diese ausgezeichneten spezifischen Struktureigenschaften stellen bisher nicht realisierbare neuartige Struktur- und Faserverbundwerkstoffe in Aussicht.

Die Kombination dieser herausragenden Eigenschaften in einem Material bietet völlig neue Möglichkeiten bei der Entwicklung adaptiver Struktursysteme auf der Grundlage multifunktionaler Leichtbauwerkstoffe. Darüber hinaus werden verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten weltweit grundlegend untersucht (z.B. Wasserstoffspeicher, katalytische Filter, molekulare Membranen, Nano-Leiterbahnen, elektrische Schalter, Feldemitter, Flachbildschirme, Reformier für Brennstoffzellen,...). Erste in der Literatur [29] veröffentlichte experimentelle Untersuchungen belegen, dass CNT ein 29-fach höheres spezifisches Arbeitsvermögen aufweisen als Ferroelektrika (z.B. Piezokeramik).

Am Institut für Strukturmechanik werden im Bereich Adaptronik Untersuchungen mit CNT durchgeführt. Ziel ist einerseits die Bestimmung der aktuatorischen Wirksamkeit von CNT, und andererseits die Entwicklung von Aktuatoren auf der Basis von CNT. Diesbezüglich werden Versuche zur Bestimmung der freien Dehnung und des Arbeitsvermögens eines auf Carbon-Nanotubes basierenden Halbzeuges, dem sogenannten Bucky-Paper durchgeführt. Der aktuatorische Wirkmechanismus basiert auf elektrochemischen Vorgängen zwischen den Carbon-Nanotubes und einem Elektrolyt, das die für die Funktion benötigten Ionen bereitstellt. Hierzu ist es erforderlich einen Kontakt zwischen den CNT und dem Elektrolyt zu gewährleisten, so dass die CNT durch das Anlegen einer elektrischen Spannung aktiviert werden können.

Die Fähigkeit elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln, in Verbindung mit extrem hohen Festigkeiten (~30 GPa) und Steifigkeiten (~1 TPa), machen Carbon-Nanotubes zu einem idealen Werkstoff für zukünftige adaptronische Systeme.

## Einleitung

Heute üblicherweise in der Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie und im Maschinenbau allgemein zum Einsatz kommende Konstruktionsmaterialien gelangen zunehmend an die Grenze dessen, was mit passiven Strukturen erreicht werden kann. Intelligente Strukturen auf der Basis von multifunktionalen Materialien erlauben extreme Leichtbaukonstruktionen, welche außerdem in der Lage sind, außergewöhnlichen strukturellen Belastungszuständen zu widerstehen. Aufgrund ihrer herausragenden aktiven und passiven Eigenschaften bieten Carbon-Nanotubes das Potenzial, leichte und hoch effiziente adaptive Strukturen zu verwirklichen.

## Historie und Struktur

Bis zur Mitte der 80'er Jahre waren lediglich zwei Erscheinungsformen des Kohlenstoffs bekannt. Hierbei handelte es sich um Graphit und Diamant. Die Atomgitterstruktur des Graphit besteht aus Kohlenstoffatomen, die in Ebenen von vernetzten Hexagonen mit einer schwachen Bindung zwischen den Ebenen angeordnet sind. In der Atomgitterstruktur des Diamant sind die Kohlenstoffatome in alle drei Raumrichtungen durch kovalente Bindungen in Form von Tetraedern miteinander verbunden. 1985 wurde von H. Kroto und R. Smalley eine dritte Erscheinungsform des Kohlenstoffs entdeckt [9]. Seine Struktur hat eine starke Ähnlichkeit zu den Kuppelbauten des amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller, woraus auch deren Namensgebung „Fulleren“ (Bild 1) resultiert. Die Kohlenstoffatome des Fulleren sind durch Bindungen, die in der Krümmungsebene liegen, und durch schwache Bindungen senkrecht zur Krümmungsebene verbunden [1].

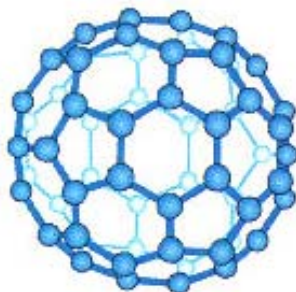


Bild 1: Fulleren

1991 wurde von dem Japaner Sumio Iijima eine weitere Kohlenstoffstruktur in Form von Röhren entdeckt, welche aus geschlossenen zylindrisch geformten Graphitebenen (Bild 2) besteht [7]. Diese sogenannten Carbon-Nanotubes (CNT) haben einen Durchmesser von 1-50 nm und kön-

nen eine Länge von mehreren Mikrometern erreichen. Das Interesse an Carbon-Nanotubes war aufgrund des damaligen Fertigungsverfahrens, das hauptsächlich zu konzentrischen Bündeln, den sogenannten Multi-Walled Nanotubes (MWNT), führte, zunächst zurückhaltend. Der Grund für diese Zurückhaltung war unter anderem darin begründet, dass die Verifizierung der theoretisch ermittelten physikalischen Eigenschaften nur an den sogenannten Single-Walled Nanotubes (SWNT) verlässlich vorgenommen werden kann.

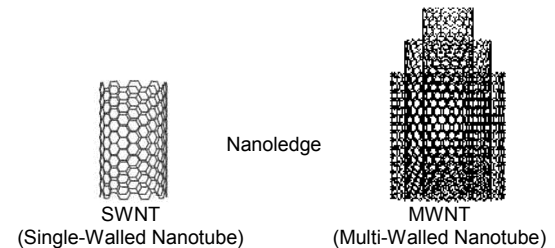


Bild 2: Single-Walled Nanotube (SWNT) und Multi-Walled Nanotube (MWNT)

Seit der Einführung von neuen effektiven Produktionsmethoden von CNT beginnt das Interesse an Carbon-Nanotubes zu steigen [26]. Abgesehen von SWNT und MWNT gilt es zwischen achiralen (hochsymmetrisch) und chiralen (spiralförmig symmetrisch) Carbon-Nanotubes zu unterscheiden (Bild 3). Des weiteren erfolgt eine Unterteilung der achiralen CNT in „zig-zag“- und „arm-chair“-Strukturen. Diese weitere Unterteilung ist insofern von Bedeutung, weil CNT in Abhängigkeit von ihrer chiralen Struktur ein unterschiedliches mechanisches und elektrisches Verhalten aufweisen [3, 21, 22]. Ein Beispiel dieser Abhängigkeit von der Chiralität stellen die elektrischen Eigenschaften von CNT dar. Während „arm-chair“-Strukturen elektrisch Leitern wie metallische Leiter, weisen anderen Nanotube-Strukturen Halbleitereigenschaften auf [3].

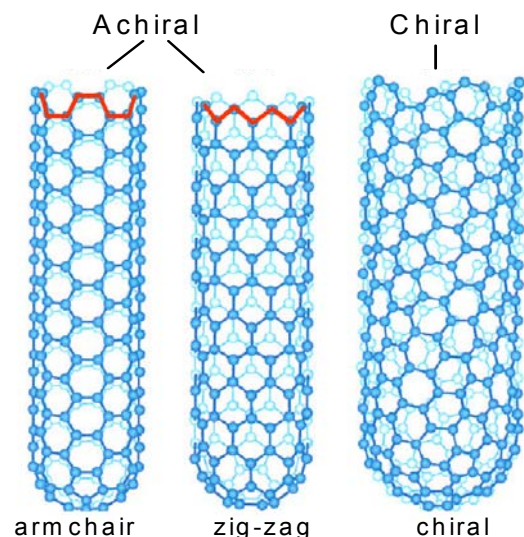


Bild 3: Achirale und chirale CNT

## Herstellung

Die Verfahren zur Herstellung von Carbon-Nanotubes, die derzeit am häufigsten eingesetzt werden, sind Lichtbogenentladung, Laserverdampfung [16] und Chemische Gasphasenabscheidung (Chemical-Vapor-Deposition: CVD).

Bei der Herstellung durch *Lichtbogenentladung* (Bild 4) wird unter Heliumatmosphäre ein Lichtbogen zwischen zwei Graphitelektroden erzeugt. Dabei entstehen Carbon-Nanotubes, die sich mit dem Ruß an der Kathode ablagern. Dabei müssen die Prozessparameter so eingestellt werden, dass möglichst viele Nanotubes der selben Größe entstehen. Darüber hinaus sollten vorwiegend Single-Walled Nanotubes erzeugt werden, da die meisten Modelle und Simulationen auf SWNT basieren. Außerdem verringert bei Multi-Walled Nanotubes die geringe Schubübertragung zwischen inneren und äußeren Nanotubes die theoretisch mögliche Steifigkeit [1, 14]. Das Wachstum der SWNT kann durch hinzufügen eines metallischen Katalysators verstärkt werden [2, 6, 8, 13, 16].

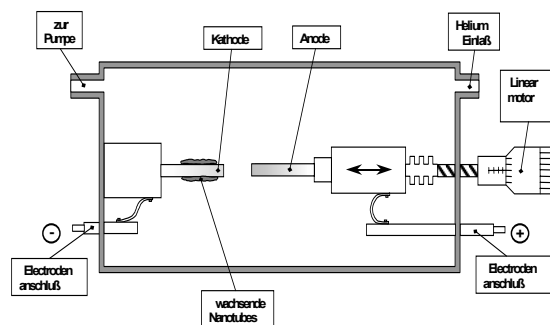


Bild 4: Herstellung von CNT durch Lichtbogenentladung [3]

Das zweite Verfahren zur Herstellung von CNT ist die *Laserverdampfung* von Kohlenstoff aus einem Graphitblock heraus. Dazu wird ein Laserstrahl auf den Graphitblock gerichtet (Bild 5). Die herausgelösten Kohlenstoffpartikel werden mit dem Argonfluss zu einer wassergekühlten Kupferelektrode transportiert, an der die CNT wachsen [11, 18, 25].

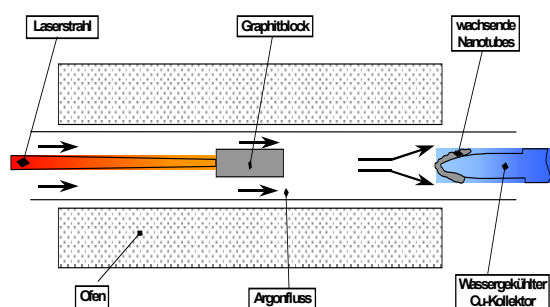


Bild 4: Herstellung von CNT durch Laserverdampfung [3]

Eine weiteres Herstellungsverfahren, stellt die *Chemische Gasphasenabscheidung* (CNT) dar (Bild 6). Dabei werden Nickelpartikel mit einem Durchmesser von etwa 30 nm auf das Substrat gegeben. Darüber wird Kohlenstoff verteilt, der sich durch Erhitzung oberhalb von 1000°C in Röhren anordnet, die Abmessungen im Nanometerbereich haben. Diese Umwandlung der Anordnung lässt sich darauf zurückführen, dass sich der Kohlenstoff kreisförmig um die katalytisch wirkenden Nickelpartikel herum anlagern. Hat der Kohlenstoff ein Nickelpartikel komplett eingehüllt, so ist es energetisch am günstigsten, wenn sich neu hinzukommende Kohlenstoffatome so anlagern, dass sich die kugelförmige Kohlenstoffstruktur in eine Röhre umwandelt.

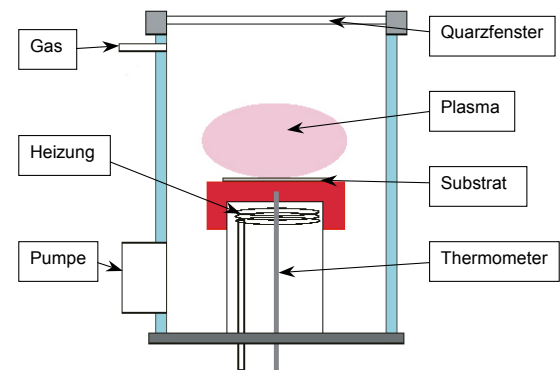


Bild 6: Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) [30]

## Eigenschaften

Carbon-Nanotubes haben außerordentlich gute mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften. Sie weisen erheblich höhere E-Module und Streckgrenzen auf als z.B. Aluminium oder heutige kohlefaserverstärkte Kunststoffe (Bild 7).

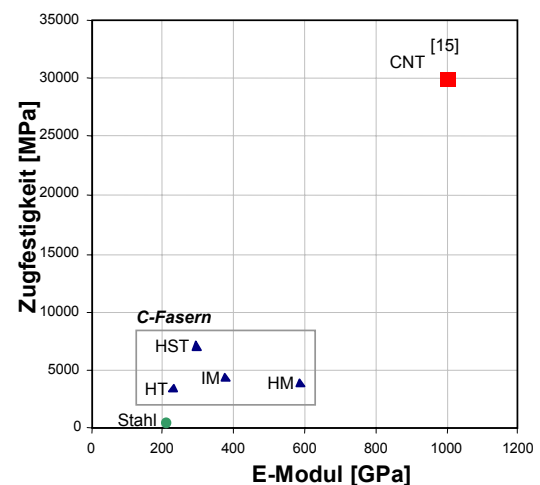


Bild 7: Vergleich unterschiedlicher Strukturwerkstoffe

Neben diesen bemerkenswerten mechanischen Eigenschaften zeigen Carbon-Nanotubes auch exzellente aktuatorische Eigenschaften. Bei angelegter elektrischer Spannung dehnen sie sich aus.

Auf Basis der heute bekannten Daten erreichen CNT aktive Dehnungen maximal 0,8%. Dieser Wert liegt deutlich höher als der bekannter Festkörperaktuatoren wie beispielsweise Piezokeramiken. Die besten piezokeramischen Werkstoffe erreichen Dehnungen von höchstens 0,1% und benötigen hierfür mehrere hundert Volt Spannung. Die bereits experimentell bestätigte Steifigkeit von CNT beträgt bis zu 1TPa. Unter Berücksichtigung dieser enormen Steifigkeit (die Steifigkeit von Stahl beträgt 0,2 TPa) würden 0,8% Dehnung bei einer aktuatorisch wirksamen Querschnittsfläche von 1 mm<sup>2</sup> eine Kraft von 4800 N erzeugen. Im Vergleich dazu bieten piezokeramische Werkstoffe unter den gleichen Voraussetzungen lediglich 150 N. Gelingt es die aktuatorischen Eigenschaften der einzelnen Nanotubes auf makroskopische Strukturen zu übertragen, stehen Aktuatoren mit bisher unbekannter Leistungsfähigkeit zur Verfügung [15, 29].

	Piezokeramik (PZT)	Piezopolymer (PVDF)	Magnetostrictor Terfenol-D	SMA	Carbon-Nanotubes (CNT)
E-Modul [Gpa]	70	2	40	20-80	270-1800 <sup>[28]</sup>
Zugspannung [Mpa]	80	180	28	1000	3600-63000 <sup>[28]</sup>
max. el. Dehnung [%]	0,1	0,2	0,1	10	0,8 <sup>[15]</sup>
max. Temperatur [°C]	160	80-120	280	400	2800 <sup>[28]</sup>
Dynamik	<10 kHz	<10 kHz	<10 kHz	<2 Hz	<1 kHz <sup>[29]</sup>
Preis [€/kg]	50	50	250	1000	10-750 €/g

Bild 7: Eigenschaften aktiver Materialien

## Versuche

Als ein Beispiel für eine makroskopische Struktur, die aus Carbon-Nanotubes besteht, steht die Faser (Bild 9), der durch Injektion einer Nanotubedispersion in eine Polymerlösung hergestellt wurde [20]. Diese Faser besteht aus ausgerichteten Nanotubes, und zeigt Festigkeiten sowie Steifigkeiten, die immer noch weit von denen eines einzelnen Nanotubes entfernt liegt, aber dennoch das 10-fache von dem betragen, was alle sonstigen bisher aus CNT hergestellten Strukturen aufweisen.

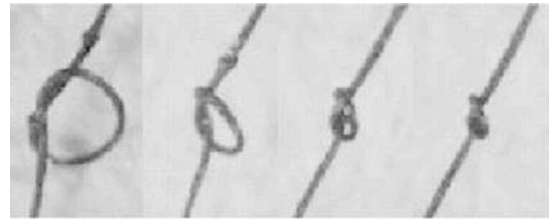


Bild 9: Faser aus CNT und einem Polymer [19]

Um die aktuatorische Wirkung von Carbon-Nanotubes zu untersuchen, wird das so genannte „Bucky-Paper“ verwendet (Bild 10). Bucky-Paper ist eine Art von Fleece, das durch Vakuumfiltration hergestellt wird. Es besteht aus statistisch verteilten CNT Bündeln. Zwischen den einzelnen Nanotubes besteht nur eine schwache Haftung, was zu sehr spröden Materialeigenschaften des Bucky-Papers führt. Der nächste Schritt hin zu einer Stabilisierung des Bucky-Papers ist die beidseitige Applikation des Papers auf einem Klebestreifen (Bild 10). Dieser Aufbau ermöglicht die Handhabbarkeit des Bucky-Papers, wodurch eine Messung der aktiven Eigenschaften von Nanotubes ermöglicht wird.



Bild 10: SWNT Bucky-Paper mit 50% Nanotubeanteil

Um ein Bucky-Paper zu aktivieren müssen sich Ionen an die einzelnen Nanotubes anlagern können. Dazu muss es von einem Elektrolyt umgeben sein. Der hierfür verwendete Elektrolyt ist eine einmolare NaCl Lösung. Werden die zwei Pole einer Spannungsquelle so an das Bucky-Paper gelegt, dass ein Strom durch Paper und Elektrolyt fließt, so wandern Ionen durch den Elektrolyten zum Bucky-Paper und lagern sich dort um die Nanotubes herum an [29]. Durch eine elektrochemische Wechselwirkung mit den Ionen dehnen sich die Nanotubes aus. Das gilt sowohl für Anionen, als auch für Kationen. Dies ist der dominierende Effekt bei der aktiven Wirkung von Nanotubes.

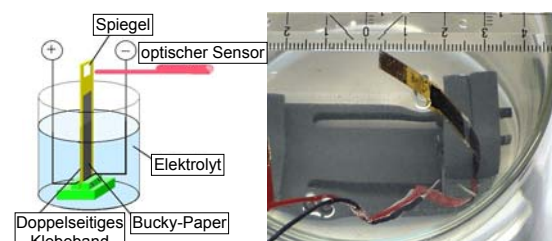


Bild 11: Versuchsaufbau mit Bucky-Paper



Der Versuchsaufbau zum Nachweis dieser Charakteristik des Bucky-Papers besteht aus dem oben beschriebenen Doppelseitigen Klebeband mit beidseitig appliziertem Bucky-Paper. Die beiden Bucky-Paper werden entweder mit dem Plus- und dem Minuspol der Spannungsquelle kontaktiert (Bild 11), oder es wird nur ein Bucky-Paper direkt elektrodiert, wobei der zweite Pol der Spannungsquelle als freie Elektrode ins Elektrolytbad eingebracht wird (Bild 12). Bei dieser Art der Elektrodiierung wird nur eines der beiden Bucky-Paper aktiviert. Die folgenden Ergebnisse wurden aus Versuchen mit diesem Aufbau erzielt.

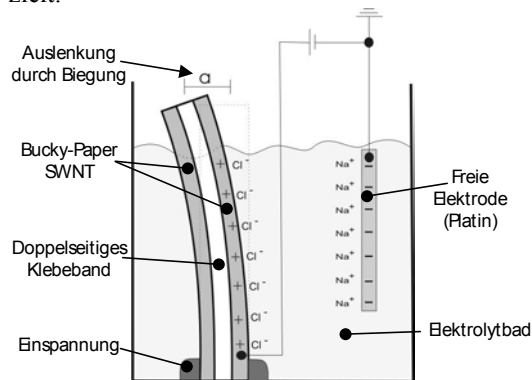


Bild 12: Prinzip der Nanotube Bucky-Paper Aktivierung

Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung fließt ein Strom durch Bucky-Paper und Elektrolyt zur freien Elektrode. Dadurch sammeln sich Ionen am angeschlossenen Bucky-Paper, das sich daraufhin ausdehnt. Dadurch ergibt sich eine Biegung der Probe, die über einen laseroptischen Sensor gemessen werden kann. Wird die Stromrichtung umgekehrt, so fließen die angelagerten Ionen (z.B. Kationen) ab, wobei die Dehnung und damit auch die Biegung abnimmt. Sind alle Ionen abgeflossen, so lagern sich die Ionen mit entgegengesetzter Ladung (also z.B. Anionen) an die Nanotubes an. Die CNT dehnen sich wieder aus. Daraus lässt sich ein grundsätzlicher Zusammenhang für diesen Effekt der aktorischen Wirkung von Nanotubes zwischen Ladung und Dehnung wie in Bild 13 gezeigt darstellen. Die Randbereiche mit sehr kleiner und sehr großer Ladung, in denen sich Sättigungsprozesse abspielen, werden in diesem Paper nicht betrachtet. Der Kurvenverlauf kann in drei Bereiche, die unterschiedliche Ladungszuständen repräsentieren, unterteilt werden.

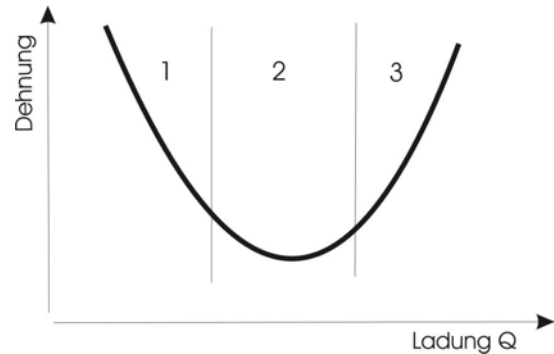


Bild 13: Schematisch: aktorisches Verhalten von Nanotubes mit Einteilung der Ladungszustände in 3 Bereiche

In erster Näherung kann in den Bereichen 1 und 3 von einem linearen Zusammenhang zwischen Ladung ( $Q$ ) und Dehnung am Bucky-Paper ausgegangen werden. Des Weiteren kann ein linearer Zusammenhang zwischen Auslenkung durch Biegung ( $a$ ) und der Dehnung des Bucky-Papers angenommen werden. Damit gilt je nach Bereich:

$$Q \sim -a \quad \text{bzw} \quad Q \sim a$$

Der allgemeine Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung ( $U$ ) kann unter Berücksichtigung des ohmschen Widerstandes ( $R$ ) folgendermaßen geschrieben werden:

$$\pm a \sim Q = \frac{1}{R} \int U dt$$

Danach liegt in den Bereichen 1 und 3 zwischen Auslenkung und Spannung ein integraler Zusammenhang vor. Zur experimentellen Bestätigung dieses Zusammenhanges wurde die Antwort des Systems bei Anlegen einer konstanten Spannung betrachtet (Bild 14). Das Anlegen der „konstanten“, negativen Spannung ergibt zuerst ein (in erster Näherung) lineares Abfallen der Auslenkung, bis der Umschlagpunkt (Bereich 2) erreicht ist. Danach steigt die Auslenkung wieder an. Wird die Polarisation der Spannung umgekehrt, so sinkt die Auslenkung wieder bis zum Umschlagpunkt, um darauf erneut anzusteigen. Damit ist gezeigt, dass nicht die angelegte Spannung über die Dehnung von Bucky-Paper entscheidet, sondern die Ladung. Wird die Spannung an einem beliebigen Punkt des Versuches auf Null gestellt, so ändert sich auch die Dehnung nicht mehr. Wird dagegen eine positive Spannung angelegt, so ändert sich die Dehnung in Abhängigkeit der Ladung, die das Bucky-Paper bereits trägt. Sinkt die Dehnung zum Beispiel beim Anlegen einer Spannung im Bereich 1, so wird die selbe Spannung einen Probenkörper, der sich von seinem Ladungszustand her im Bereich 3 befindet, zum Ausdehnen bringen.

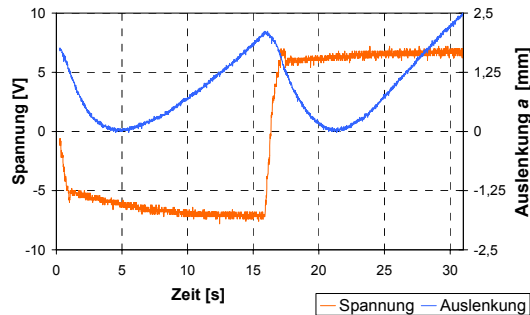


Bild 14: Antwortverhalten eines Bucky-Paper-Streifens

Geht man nun auf harmonische Anregungen der CNT über, so ist für das Antwortverhalten des Bucky-Papers der Ladungszustand vor der Anregung (also der Bereich, in dem sich das Bucky-Paper befindet) von entscheidender Bedeutung.

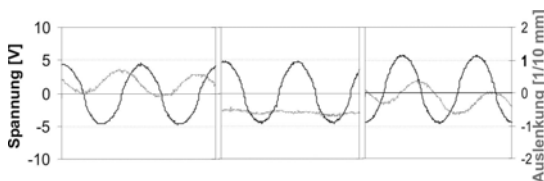


Bild 15: Dynamisches Antwortverhalten eines Bucky-Paper-Streifens: Anregung (Schwarz) jeweils  $\pm 5V$ ; 0,6 Hz; Die Darstellungen zeigen die Antwort (Grau) für die Bereiche 1, 2 und 3; die Nullpunkte der Auslenkung wurden beliebig gewählt

In Bild 15 sind die unterschiedlichen Antwortverhalten für die drei Bereiche dargestellt. Bereich 1 und 3 unterscheiden sich in der Phasenlage ( $+90^\circ$ , oder  $-90^\circ$ ). Dies bestätigt den oben angenommenen integralen Zusammenhang zwischen Spannung und Auslenkung in diesen Bereichen. Es ist jeweils eine Drift hin zu einer geringeren Auslenkung zu beobachten. Für Bereich 2 ist hingegen kaum ein Antwortsignal erkennbar. Auch dies Ergebnis passt zum Ladungszustand des Papers. Im Bereich 2 bewirkt eine Änderung der Ladung, die ja durch eine Spannungsänderung hervorgerufen wird, nur sehr geringe Auslenkungen.

Für die Anwendung als Aktuator ist also der Bereich der Vorladung von entscheidender Bedeutung. Die Phasenlage der Systemantwort hängt direkt davon ab. Die Größe der Vorladung beeinflusst die Amplitude des Ausgangssignals. Daher wird für dynamische Anwendungen eine Sinusspannung mit einem Nulloffset zur Erhaltung der Vorladung empfohlen.

## Mögliche Anwendungen

Die Kombination von außergewöhnlich hohen gewichtsspezifischen strukturellen und aktuatorischen Eigenschaften ermöglicht die Entwicklung für ganz neue Anwendungsfelder. Derzeit werden national und international folgende Einsatzbereiche diskutiert und untersucht:

- Aktuator (künstlicher Muskel)
- Verstärkung für Verbundwerkstoffe (CNT-Nanocomposites)
- Raster-Kraft-Mikroskop (Spitze)
- Füllstoff für elektrisch leitenden Kunststoff (Blitzschlag- und elektrostatischer Aufladungsschutz)
- Elektronische Nanokomponenten (Dioden, Transistoren...)
- Wasserstoffspeicher für Brennstoffzellen
- Batterien mit erhöhter Lebensdauer
- Sensoren für giftige Gase

## Zusammenfassung

Für den Bau adaptiver Strukturen werden Materialverbunde benötigt, die aktive, sensorische und passive Eigenschaften vereinen. Einige dieser dazu erforderlichen multifunktionalen Werkstoffe sind Piezokeramiken, Formgedächtnislegierungen und Magnetostriktiva. Die adaptive Struktur besteht damit immer aus einem inhomogenen Verbund von Struktur- und Multifunktionswerkstoff. Die Kombination von hervorragenden passiven und aktiven Eigenschaften dieser Carbon-Nanotubes birgt ein großes Potenzial für die Entwicklung von adaptiven Strukturen, die aktive und lasttragende Eigenschaften in einem homogenen Werkstoff vereinen. Die Entwicklungserfolge bezüglich der Länge und Ausrichtung der CNT lassen eine Anwendung in der Adaptronik immer näher kommen.

Nichts desto trotz ist noch ein großer Einsatz und die konsequente Weiterentwicklung in dieser Richtung notwendig, um das Potential von Carbon-Nanotubes vollständig auszuschöpfen. Folgende wesentliche Themenkreise, sind zu untersuchen:

- Verbesserung von Aktuatoren auf der Basis eines Festkörperelektrolyts
- Übertragung herausragender Eigenschaften eines einzelnen Nanotube in makroskopische Eigenschaften (z.B. Nanotube-Fasern)

## Literatur

1. PM Ajayan, LS Schadler, C. Giannaris et al.; Single-walled nanotube-polymer composites: strength and weaknesses, *Advanced Materials* 12 (10), S.750-753 (2000)
2. DS Bethune, CH Kiang, MS Devries et al.; Cobalt-catalyzed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls, *Nature* 363, S.605-607 (1993)
3. J.F. Harris Peter, *Carbon Nanotubes and Related Structures – New Materials for the Twenty-first Century*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999
4. H. Hoffschulz, J. W. Otto and H. Eickenbusch. March 1998. *Technologieanalyse Na-*



- noröhren VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien.
5. S. Iijima, C. Brabec, A. Maiti et al.; Structural flexibility of carbon nanotubes, *Journal of Chemical Physics* 104(5), S.2089-2092 (1996)
  6. S. Iijima, T. Ichlhashi; Single-shell carbon nanotubes of 1nm diameter, *Nature* 363, S.603-605 (1993)
  7. S. Iijima; Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature* 354, S.56 (1991)
  8. C. Journet, W K Maser, P Bernier et al.; Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by electric-arc technique, *Nature* 388, S.756-758 (1997)
  9. H. Kroto, J. Heath, S. O'Brien, R. Curl, R. Smalley; *Nature* 318, S.162 (1985)
  10. J. Liu, A. Rinzler, H. Dai u.a.; *Science* 280, S.1253 (1998)
  11. Rinzler, J Liu, H Dai et al.; Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes: Process, product and characterization, *Applied Physics A* 67(1), S.29-37 (1998)
  12. R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus; *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London, 1999
  13. Y. Saito, K Nishikubo, K Kawabata et al.; Carbon nanocapsules and single-layered nanotubes produced with platinum-group metals (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) by arc discharge, *Journal of Applied Physics* 80(5), S.3062-3067 (1996)
  14. LS Schadler, SC Giannaris, PM Ajayan; Load transfer in carbon nanotube epoxy composites, *Applied Physics Letters* 73 (26), S.3842-3844 (1998)
  15. Y. Bar-Cohen; *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles*; SPIE Press 2001
  16. Z. Shi, Y Lian, FH Liao et al.; Large scale synthesis of single-wall carbon nanotubes by arc discharge method, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 61 (7), S.1031-1036 (2000)
  17. M. Stuart, *A Materials and Processes Odyssey*, May 6-10, SAMPE 2001, Long Beach CA
  18. A. Thess, R Lee, P Nikolaev et al.; Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes, *Science* 273, S. 483-487 (1996)
  19. E. T. Thostenson, Z Ren, T W Chou; *Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review*, *Composites Science and Technology* 61, S.1899-1912 (2001)
  20. B. Vigolo, A Penicaud, C Coulon; *Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes*, *Science* 290, S.1331-1334 (2000)
  21. BI Yakobson, CJ Brabec, J Bernholc; Nanomechanics of carbon tubes: instabilities beyond linear range, *Physical Review Letters* 76 (14), S. 2511-2514 (1996)
  22. BI Yakobson, G Samsonidze; Atomistic theory of mechanical relaxation in fullerene nanotubes, *Carbon* 38(11-12), S.1675-1680 (2000)
  23. BI Yakobson, MP Campell, CJ Brabec et al.; High strain rate fracture and C-chain unraveling in carbon nanotubes, *Computational Materials Science* 8(4), S.341-348 (1997)
  24. MPI Stuttgart, press information PRI C6/99 (15)
  25. Y. Zhang, S Iijima; Formation of single-wall carbon nanotubes by laser ablation of fullerenes at low temperatures, *Applied Physics Letters* 75(20), S.3087-3089 (1999)
  26. P. Zhang, Y. Huang, P.H. Geubelle et al.; The elastic modulus of single-wall carbon nanotubes: a continuum analysis incorporating interatomic potentials, *International Journal of Solids and Structures* 39 (2002) 3893-3906
  27. FAMU-FSU College of engineering; Fully and systematically investigate and characterize the mechanical and physical properties of nanotube bucky paper.
  28. Thostenson, *Composites Science and Technologie* 61 ,2001
  29. Baughman, *Science* 284, 1999
  30. H. P. Monner, S. Mühle, P. Wierach; *Carbon Nanotubes as actuators in smart structures*, SPIE 2.-6. März 2003, San Diego