

Kohle veredeln – der Weg zu Carbon-Nanotubes und deren Nutzung

Unser Verständnis von Materialien, Fertigungstechniken und ihren Anwendungen geht laufend weiter. Dies betrifft insbesondere das Halbleitermaterial Silizium, das unsere Zeit in den letzten sechs Jahrzehnten grundlegend geprägt hat. Es begann mit der Erfindung der Transistoren 1947 in den Bell-Laboratorien, durch die sich innerhalb weniger Jahre der Industriezweig der Mikroelektronik entwickelt hat. Mit diesen elektronischen Produkten und den daraus abgeleiteten Sensoren wurde unser heutiges Leben stark geprägt. Die Fertigungstechnik profitierte von der Miniaturisierung, die Strukturen wurden immer kleiner, die Bauelemente gleichermaßen empfindlicher und kostengünstiger.

Heute stehen wir an einer vergleichbaren Schwelle durch die Erforschung und daraus erwarteten vielfältigen Nutzung von Kohlenstoff. Denn reinen Kohlenstoff kennen wir schon seit langem in seinen Modifikationen als Graphit und als Diamant. In Graphit bilden die Kohlenstoffatome sechseckige Ringe, die in der Ebene stark gebunden sind, senkrecht dazu nur schwach, wodurch die Ebenen gegeneinander leicht gleiten können. Im Diamant dagegen sind die Kohlenstoffatome tetraederförmig angeordnet, woraus die extrem große Härte resultiert. Sei-

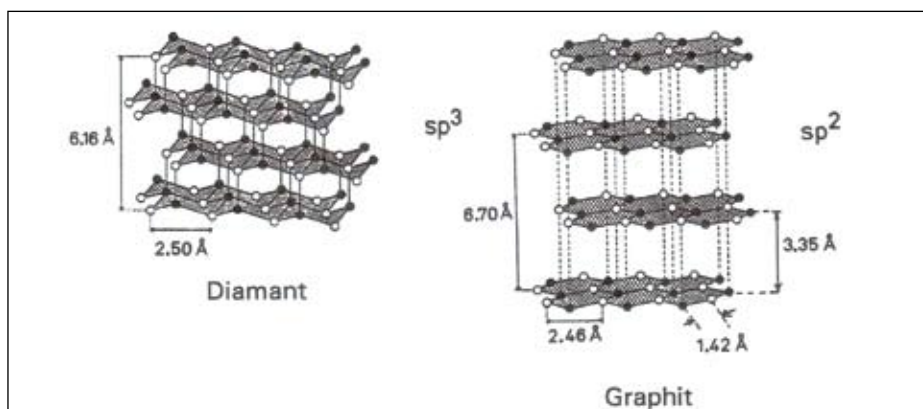
linear oder verzweigt. Wenn diese dann auch noch Verbindungen mit Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff eingehen, dann gibt es dafür »unzählige« Möglichkeiten, die in der Natur letztlich zur Entstehung und Weiterentwicklung des Lebens geführt haben.

Wir schätzen Kohlenstoff als Diamant. In Schmuckstücken krönt er die Häupter von Monarchen, das größte Exemplar ist der Cullinan, der 1906 in Südafrika gefunden wurde und aus dem 105 geschliffene Edelsteine gewonnen wurden, die heute in den britischen Kronjuwelen kunstvoll verar-

beitet sind. Diese kleineren Industriediamanten finden Anwendung als Schleifmittel, abriebfeste Schutzschichten, Kühlkörper für mikroelektronische Bauteile, Fenster für Laser sowie für Bohr- und Schneidwerkzeuge.

Der britische Astrophysiker Kroto interessierte sich Anfang der 80er Jahre für die Verhältnisse in »Rote-Riesen-Sterne« und hat 1985 mit Chemikern aus Texas deren Atmosphäre in Laser-Verdampfungsanlagen untersucht und dabei eine neue stabile Kohlenstoff-Modifikation entdeckt, die aus 60 bzw. 70 Kohlenstoffatomen besteht. Diese Struktur wurde interpretiert in Analogie zu modernen Kuppelbauten des Architekten Buckminster Fuller. Solch eine Struktur besteht aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken. 1990 konnte dies auch bewiesen werden, als wägbare Mengen dieser Substanz hergestellt werden konnten.

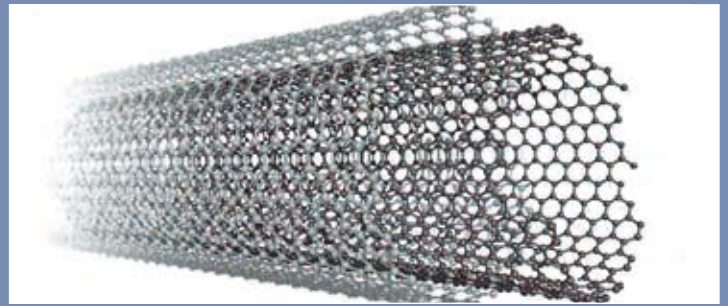
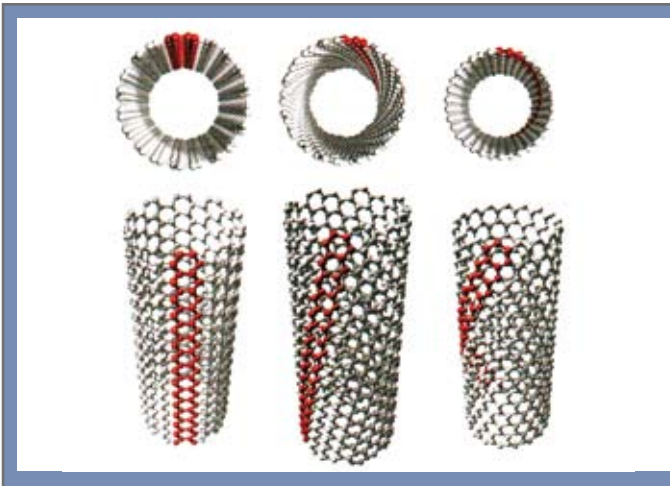
Danach begannen viele Forschergruppen weltweit, Kohlenstoff in Herstellung zu untersuchen. Erfolg hatte 1991 der japanische Forscher Sumio Iijima von der NEC Corporation, der mit den Kohlenstoff-Nanoröhren eine weitere interessante Kohlenstoff-Modifikation entdeckte. Eine Nanoröhre besteht quasi aus zusammengerollten Graphitschichten. Ihr Durchmesser beträgt nur wenige Nanometer. Trotz minimaler Größe bilden die Nanoröhren einen faszinierenden Werkstoff. Sie sind extrem reissfest, elastisch und strapazierfähig. Kohlenstoff-Nanoröhren besitzen beispielsweise die zehnfache Zugfestigkeit von Stahl, bei nur einem Sechstel von dessen Gewicht. Für die Elektronik und Sensorik sind sie von großem Interesse, da sie leitend oder halbleitend sind, je nachdem, wie die Graphitschichten aufgerollt sind. Deshalb werden die Materialien, ihre Her-



▲ Struktur von Diamant und Graphit

ne Sonderstellung verdankt der Kohlenstoff als chemisches Element Nummer 6 im Periodensystem vor allem einer Eigenschaft: Jedes Atom kann sich mit einem, zwei, drei oder vier gleichartigen Partnern verbinden. So entstehen Ringe, Käfige und Ketten,

beitet sind. Wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit und großen Härte wird Diamant auch industriell in der Elektronik und Optikindustrie genutzt. Dabei kann man heute Diamanten auch künstlich aus Graphit bei extrem hohen Temperaturen und mit extre-



▲ Darstellung eines Vielfach-Kohlenstoff-Nanoröhrchens (MWNT)

◀ Kohlenstoff-Nanoröhren sind aus sechseckigen Anordnungen von Kohlenstoff-Atomen aufgebaut

stellverfahren und ihre potenziellen Anwendungen heute intensiv untersucht.

Dabei sind die zuerst gefundenen mehrlagigen Kohlenstoffröhrchen (multiwall Nanotubes, MW-CNT) zu unterscheiden und die seit 1993 bekannten einlagigen (single wall Nanotubes, SW-CNT). Meist entstehen Gemische, in denen die mehrlagigen überwiegen. Der Außendurchmesser variiert von 0,4 nm bis zu über 100 nm. Solche CNTs sind außerordentlich stabil, an Luft können Sie bis auf etwa 100 °C erhitzt werden, im Vakuum bis 2.800 °C. Die Länge der CNTs schwankt je nach Herstellbedingungen zwischen einigen µm und bis zu einigen 100 µm. Am Ende sind die CNT oftmals offen oder wie die »Bucky-Balls« halbkugelförmig geschlossen. Heute beginnt man, diese Eigenschaften von CNT zu verstehen und gezielt zu selektieren, nach den elektrischen Eigenschaften – metallisch, halbleitend oder isolierend –, nach der sesselförmigen, chiralen oder Zig-Zag-Anordnung der Kohlenstoffbindungen in den Röhrchen, nach einfachen Röhrchen (Single-Wall-Strukturen) oder Multi Wall-Strukturen. Die Entwicklungen gehen hier weiter. Im Jahre 2004 präsentierten Andre Geim und Kostya Novoselov von der Universität Manchester die nächste Kohlenstoff-Modifikation, das Graphen. Dies konnten sie aus Bleistift-Abrieb mittels Tesafilm ablösen und auf Siliziumoxidunterlagen anlagern und dann untersuchen. Hier liegt Koh-

lenstoff in Ebenen von wabenartig vernetzten Atomen vor, die ihre Stabilität einer leichten Wellenform von einem Nanometer Höhe verdanken.

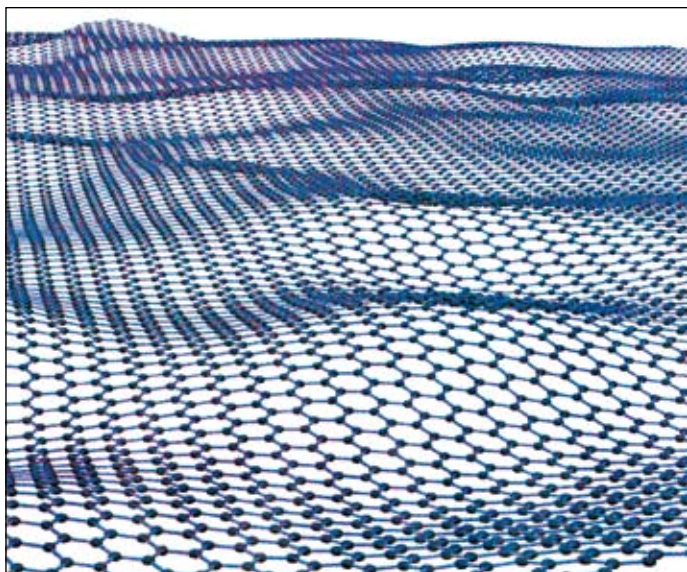
Die hervorragenden und oftmals extremen physikalischen Eigenschaften prädestinieren insbesondere die Carbon-Nanotubes nicht nur als Schlüsselmaterial einer zukünftigen Mikro- und Nanoelektronik, sondern lassen auch viele weitere Anwendungen in den Bereich des Möglichen rücken.

Hier begann man mit Anwendungen, in denen die exzellenten mechanischen Eigenschaften in Kombination mit dem niedrigen Gewicht ausgenutzt wurden, wie Carbonfaser verstärkte Kunststoffe, etwa für Hochleistungs-Tennisschläger oder Formel-1-Rennwagen-Teile.

Heute beginnt man darüber hinaus auch, die potenziellen Nutzungsmöglichkeiten in elektronischen Bauelementen, etwa als CNT-Transistor oder als Speicherelement, zu untersuchen, sowie die potenzielle Nutzung in Sensoren. Dazu gehört eine kostengünstige Herstellung gleichermaßen wie die Untersuchung der Eigenschaften unter den diversen Applikationsrandbedingungen. Denn in vielen Herstellmethoden wachsen die Nanoröhren ungeordnet auf und nicht sortiert nach ihren mechanischen und elektrischen Eigenschaften.

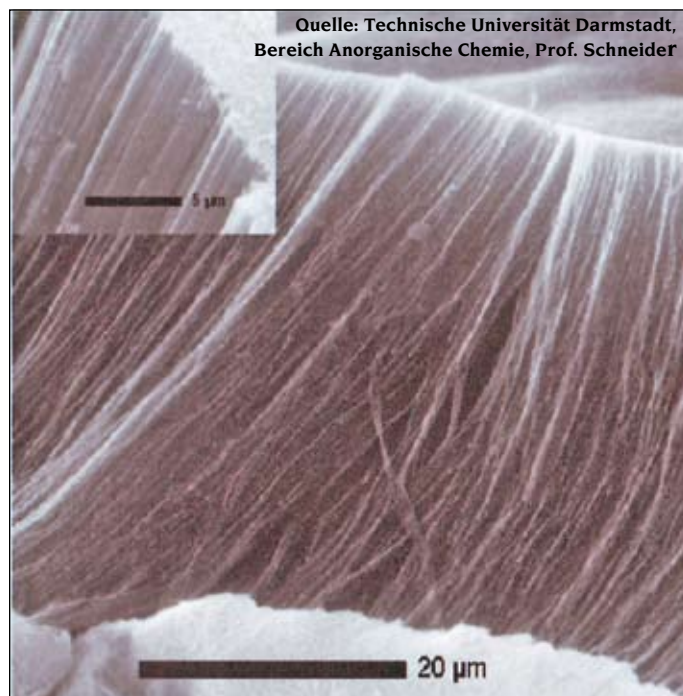
Ungeordnete CNTs verhalten sich wie eine Art »Nano-Filz«. Auch damit können schon erste, globale Eigenschaften bestimmt werden und ihre Anwendungen überlegt werden, wie Wärme-

Physikalische Eigenschaften von Carbon Nano-Tubes			
Eigenschaft	Wert	Werte von vergleichbaren Materialien/Standard-Lebensdauer	
Mechanische Festigkeit (Zug)	45 GPa	Stahl	1 GPa
Elastizitätsmodul		Stahl	210 GPa
Dichte	1,3 - 1,4 g/cm ²	Stahl	7,8 g/cm ²
Wärmeleitfähigkeit	6.000 W/mK	Diamant	3.300 W/mK
		Kupfer	400 W/mK
		Al	236 W/mK
		BeO	330 W/mK
Thermoelektrik: Seebeck-Koeffizient	60 µV/K - 200 µV/K		
Elektrische Eigenschaften:			
• Metallisch			
• Halbleitend			
• Isolierend			
Max. Stromdichte	10 ⁷ A/cm ²	Kupfer	10 ⁵ A/cm ²



▲ Die wellige Struktur stabilisiert das Graphen, ein feines Netz aus Kohlenstoff-Atomen

REM-Aufnahme einer zweidimensionalen Sensor-CNT-Anordnung; der Skalenbalken in der Abbildung ist 20 µm lang



leitfähigkeit, globale Widerstandsänderungen durch Temperatur, Druck, Magnetfeld oder durch den Einfluss von Chemikalien. Dann spielt etwa bei Gassensoren das extreme Volumen-zu-Oberflächen-Verhältnis eine günstige Rolle.

Die nächste technologisch anspruchsvollere CNT-Anordnung liegt bei der Herstellung von Schichten mit vielen mehr oder weniger parallel angeordneten Nanoröhren, dann spricht man von Nano-Rasen. Dies erscheint ein interessanter Ansatz für lotfreie bzw. klebefreie Verbindungen zu Mikrostrukturen, etwa auf Silizium-Bauelementen. Dann können gezielt Oberflächenmodifikationen an den gewünschten Flächen durchgeführt werden nach den Standard-Halbleiter-Prozessen. Auch hier werden interessante Anwendungen untersucht – beispielsweise als sensitive Schicht eines Gassensors –, dem Anwender ermöglicht die Nutzung völlig neue Effekte bei gleichzeitiger Generierung erheblicher Produktvorteile. Auch als Feldemitter in neuartigen Displays wird untersucht, wie solche quasi-geordneten Strukturen eingesetzt werden können.

Ein Engpass ist die Notwendigkeit, diese Nanostrukturen zuverlässig und kostengünstig in die Mikro- und

Makroumgebung zu integrieren. Dafür werden zurzeit vom deutschen BMBF 24 wissenschaftliche Projekte im Rahmenprogramm »Mikrosystemtechnik 2004 – 2009« seit einem Jahr gefördert. Diese hatten ihre Abschlusspräsentationen im März 2008 in Berlin. Es ging dabei nicht nur um Carbon-Nanotubes, sondern breiter, etwa zu Materialfragen und Herstellungen, Selbstmontage wie in biologischen Systemen, zu Aufbau- und Verbindungstechniken (etwa die Projekte CNT-AVT und NanoLawn am Fraunhofer-Institut IZM in Berlin), zur Montage von Nanodrähten, zu Anwendungsmöglichkeiten als Gassensoren (Projekt MNI-CNTs an der TU-Darmstadt, wir berichteten darüber in SENSOR MAGAZIN 1 [2008]) und als dielektrische Aktoren (Projekt INNTKA vom Forschungszentrum Karlsruhe und CNT-Aktoren von Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe), um geeignete technologische Ansätze zu erforschen und an ihrem Anwendungspotenzial zu messen.

Dadurch angeregt, versucht man heute auch, diese hervorragenden Materialien für elektronische Bauelemente und für Sensoren einzusetzen. Dazu ist es notwendig, eine gewisse Selektion der Nanodrähte durchzuführen (etwa nach Leitfähigkeit, nach Länge oder

Durchmesser) und deren Manipulation zu erlernen, sowohl als Multiwire-Kompartments bzw. Garne oder später auch die Manipulation von Einzeldrähten. Insbesondere die Handhabung von CNT-Einzeldrähten stellt für alle Applikationen eine extreme Herausforderung dar, die in Einzelfällen gelöst wurde. Auch daran wird intensiv gearbeitet, etwa im Projekt INANOMIK an der TU-Darmstadt.

Die Untersuchung der physikalischen und technischen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Kohlenstoff-Nanomaterialien ist zurzeit Gegenstand intensiver Forschung. Wir sehen hier extrem vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Mikroelektronik, in der Sensorik oder in Displays. Man kann gespannt sein, was alles in den nächsten Jahren auf den Markt kommen wird, ohne dass die Verbraucher es merken werden.

-gt-

Literatur:

Nanotechnologie für Dummies, R. Brooker, E. Boysen, Wiley-VCH-Verlag (2006)
 Nanotechnology, M. Köhler, W. Fritzsche, Wiley-VCH-Verlag (2004)
 Mikro-Nano-Integration für die Mikrosystemtechnik, P. Coskina, Mikrosystemtechnik-Kongress 2007, Dresden, VDE-Verlag GmbH
www.mikro-nano.de und www.mstonline.de