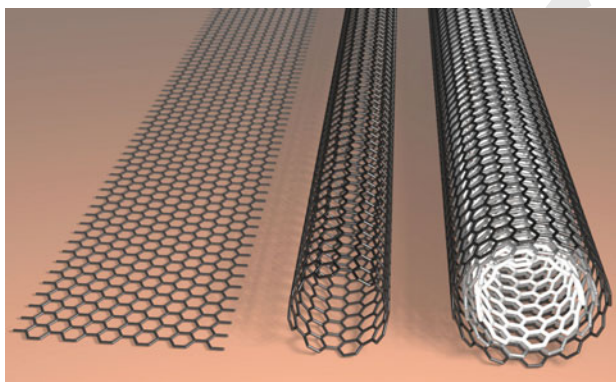


## Im Kontext: Die Wunderwelt des Kohlenstoffs

Das Wundermaterial des 21. Jahrhunderts besteht aus atomaren Lagen von Kohlenstoff. Im Fall von Graphen (einer einzelnen monoatomaren Grafitsschicht) sind diese planar angeordnet und bei Kohlenstoffnanoröhrchen (CNTs) zu geschlossenen konzentrischen Zylindern geformt. Die mechanischen, optischen und elektronischen Eigenschaften der hauchdünnen Kohlenstoffanordnung versprechen wahre Wunder in einer Vielzahl von möglichen Anwendungen. Die große mechanische Belastbarkeit basiert auf der starken  $sp^2$ -Bindung der Kohlenstoffatome und führt zu neuartigen Membranen und Kompositmaterialien. Solarzellen und optische Sensoren machen von der hohen optischen Transparenz in Verbindung mit der hohen Leitfähigkeit Gebrauch. Graphen und CNTs können 1.000-mal mehr Strom führen als Materialien wie Kupfer und Aluminium und haben dabei auch noch eine bessere Wärmeleitfähigkeit. Die Anwendungen reichen in diesem Fall vom Nanometerbereich bis in den Kilometermaßstab. So kann das Kohlenstoffmaterial sowohl als innovative Fortentwicklung der Chipverdrahtung anstelle der herkömmlichen, metallischen Verbindungsleitungen in einem Mikrochip dienen als auch, zu Bündeln geformt und in meterlanger Ausführung, das Gewicht von Stromkabeln bei gleicher Leitfähigkeit extrem reduzieren. In Kombination mit anderen metallischen wie halbleitenden Materialien ergeben sich leistungsfähige optische Komponenten und Diodenbauelemente mit äußerst niedriger Durchlassspannung und besserer Robustheit. Resistive Datenspeicherelemente lassen sich realisieren, indem man den Kohlenstoff mit kurzen Strompulsen zwischen amorphem (hoher Widerstand) und kristallinem Zustand (niedriger Widerstand) hin und her schaltet. CNTs sind bis jetzt das einzige Transistormaterial, das den Anforderungen einer weiteren Skalierung der Elektronik in den Nanometerbereich gerecht wird. So wurde erst kürzlich im Experiment nachgewiesen, dass ein nur 9 nm langer CNT-Kanal bei kleiner Spannung auch noch die Transistoreigenschaften zeigt, die ein viel größeres Bauteil besitzt. Das konnte bis jetzt bei keinem anderen Material (Graphen, Si, Ge, GaAs) gezeigt werden und unterstreicht noch einmal mehr die Bedeutung dieses Materials für die zukünftige Elektronik.



**Abbildung 36.6** Links: Struktur einer monoatomaren Grafitsschicht (auch Graphen genannt) Mitte: Struktur einer einwandigen Kohlenstoffnanoröhre Rechts: Struktur einer mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhre. (© Franz Kreupl)

Doch wie erzeugt man diese Kohlenstoffstrukturen und wie bekommt man sie dorthin, wo sie gebraucht werden? Genau mit diesen Fragestellungen beschäftigen wir uns an der TU München und entwickeln Prozesse und Integrationstechniken für diese innovativen Materialien. Denn nur wenn man die Herstellung und Integrationstechniken beherrscht, kann man die Eigenschaften dieses Materials nützen. Ursprünglich wurden Nanoröhrchen in einem Lichtbogen zwischen Kohlenstoffelektroden synthetisiert. Heute bevorzugt man die In-situ-Herstellung durch katalytische Abscheidung aus der Dampfphase (CCVD) mithilfe eines kohlenstoffhaltigen Gases. Dazu müssen an der gewünschten Stelle Katalysatorpartikel (Fe, Co, Ni) auf einem Substrat aufgebracht werden. In einem CVD-Reaktor wird das Substrat dann auf bis zu  $900^\circ\text{C}$  erhitzt und es wird kohlenstoffhaltiges Gas hinzugefügt. Am Katalysator wachsen dann die Nanoröhrchen. Durch geeignete Gasführung und Substratstruktur kann man die Wachstumsrichtung einstellen. Auch Graphen lässt sich mit dieser Methode herstellen. Nur muss man Sorge tragen, dass das Katalysatormaterial (Ni, Cu) auf keinen Fall Partikel bildet, sondern eine durchgehende metallische Schicht bleibt. Wir haben uns auch darauf spezialisiert, Vielfachlagen von Graphen ohne Katalysatormaterial direkt auf einem Wafer für Leiterbahnen und Membranen abzuscheiden. Nach erfolgreicher Integration des Materials kann man dann ein funktionelles Bauelement erstellen und dies auf seine Eigenschaften untersuchen.



Prof. Dr. Franz Kreupl forscht an der TU München an Applikationen von nano- und kohlenstoffbasierten Materialien. Im Fokus stehen Kohlenstoffnanoröhrchen, Nanodrähte und Graphen, die in der Anwendung als Bauelemente, Sensoren, Interconnects, Informations- und Energiespeicher das Potenzial haben, den Status quo erheblich zu verbessern. Mehr Informationen auf <http://www.hes.ei.tum.de>.

1. De Volder, M. V. L. et al., „Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications“, *Science* **339**, 2013, 535 <http://www.sciencemag.org/content/339/6119/535.full> (Stand: Mai 2013).
2. Kreupl, F., „Electronics: Carbon nanotubes finally deliver“, *Nature* **484**, 2012, 321 <http://www.nature.com/nature/journal/v484/n7394/full/484321a.html> (Stand: Mai 2013).
3. Hönlein, W., Kreupl, F., „Kohlenstoff-Nanoröhrchen für die Mikroelektronik?“, *Physik Journal* **10**, 2004, 39 <http://www.pro-physik.de/details/articlePdf/1107025/issue.html> (Stand: Mai 2013).