

■ Schneller Fluss dank Kohlenstoff

Die Anordnung des Kohlenstoffs in Nanoröhrchen bestimmt, wie schnell Wasser in ihnen fließen kann.

Kohlenstoff ist ein faszinierendes Element: Kohlenstoffatome ordnen sich mit ihren vier Bindungsstellen in den verschiedensten Geometrien an. In der Ebene formen sie Graphen, aufgerollt ergeben sich Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nano Tubes, CNT). Hinzu kommen das mehrschichtige Graphit und viele andere Geometrien. Ein Merkmal aller dieser Strukturen ist ihre hohe Hydrophobizität.

Diese Eigenschaft macht Kohlenstoffsysteme interessant für Anwendungen, in denen Wasser schnell transportiert werden soll. Der Frage, wie schnell Wasser in dünnen Nanokanälen aus Kohlenstoff fließt, widmen sich zwei aktuelle Publikationen. Während Lydéric Bocquet mit seiner Gruppe in Paris erstmals den hydrodynamisch getriebenen Fluss durch ein einzelnes Kohlenstoff-Nanoröhrchen untersuchte [1], beschäftigte sich Andre Geim aus Manchester mit dem Wassertransport durch Kapillaren aus Kohlenstoff [2].

Das Gesetz von Hagen-Poiseuille beschreibt den von Druck getriebenen Fluss durch einen runden, hydrophilen Kanal:

$$Q \sim \frac{\pi r^4}{L} \Delta P.$$

Die Durchflussrate Q wächst bei zunehmendem Druckunterschied ΔP und sinkt mit der Kanallänge L .

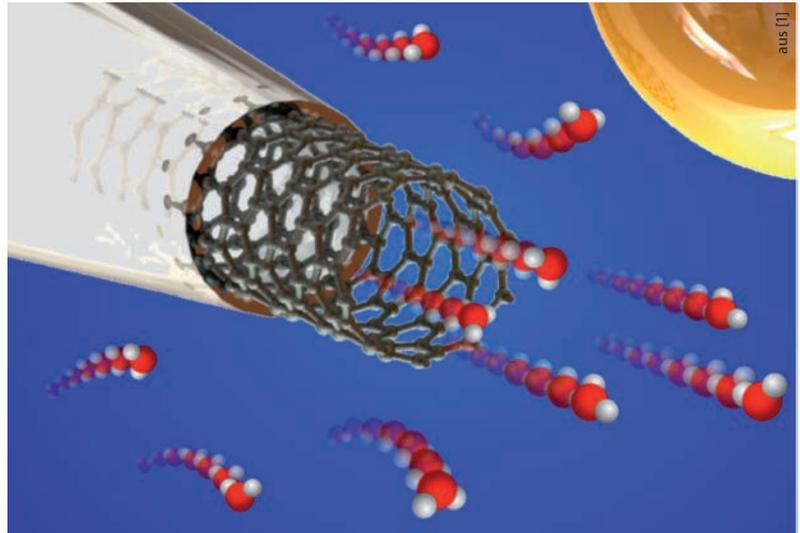


Illustration des Wasserflusses aus einem Kohlenstoff-Nanoröhrchen

Die Abhängigkeit vom Radius r lässt die Durchflussrate bei nanoskaligen Radien schnell absinken. Sie folgt aus den Randbedingungen für hydrophile Oberflächen, da Wasser dort nicht gleitet, sondern festsetzt. Die Gleitlänge ist somit Null und der Flusswiderstand durch die inneren Reibungskräfte enorm groß.^{#)} Mit hydrophoben Oberflächen erhöht sich aber die Gleitlänge und damit auch die Durchflussrate Q .

Theoretische Vorhersagen sahen in der wasserabstoßenden Eigenschaft von Kohlenstoff-Oberflächen eine Möglichkeit, die Gleitlänge zu erhöhen. Insbesondere bei Nanoröhrchen sollten Gleitlängen von mehreren 100 nm möglich sein [3].

Dann erreicht die Durchflussrate Werte, wie sie von Proteinkanälen in biologischen Zellmembranen (Aquaporinen) bekannt sind. In den letzten Jahren gab es erste vielversprechende Ergebnisse, die aber teilweise kontrovers diskutiert wurden [4].

Bocquet und Mitarbeiter bestimmen nun erstmals den Wasserfluss durch ein einzelnes Röhrchen. Dazu „kleben“ sie zunächst die Kohlenstoff-Struktur in eine konisch geformte Glaskapillare mit einer Öffnung von etwa 300 nm (Abb. 1a). Die Kapillare wird in eine Flusszelle eingesetzt, die es erlaubt, Wasser mit Druck durch das Kohlenstoff-Nanoröhrchen zu treiben. Allerdings ist der Wasserfluss viel zu gering für eine direkte Messung. Das ausströmende Wasser an der Öffnung stellt aber eine lokalisierte Impulsquelle dar, die zu einem großflächigen Strömungsfeld führt [5]. Landau und Squire beschrieben erstmals diesen Jet als eine der wenigen analytischen Lösungen der Navier-Stokes-Gleichung [6]. Weil der Landau-Squire-Jet die Punktquelle in ein makroskopisches Flussfeld im Wasser vergrößert, wird der Wasserfluss durch kleine Polystyrolkugeln sichtbar. Aus den gemessenen Flusslinien und der Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich der Fluss Q durch das Kohlen-

#) Die Gleitlänge entspricht der Strecke, die ein Fluid an einer Wand entlang gleitet.

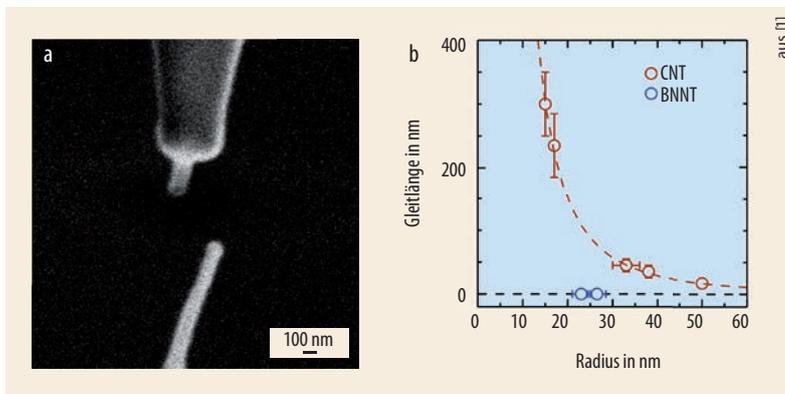


Abb. 1 Die Aufnahme mit dem Elektronenmikroskop zeigt ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen in einer Glaskapillare (a). Die Gleitlänge scheint für Nanoröhrchen

aus Kohlenstoff (CNT) bei Radien unter 15 nm zu divergieren, während sie für Bor-Stickstoff-Röhrchen (BNNT) konstant bei Null liegt (b).

stoff-Röhrchen. Die Gleitlänge nimmt überraschenderweise mit abnehmendem Radius zu und erreicht Werte von bis zu 300 nm (Abb. 1b). Die Messungen deuten darauf hin, dass die Gleitlänge bei einem Radius von etwa 10 nm weiter dramatisch zunehmen könnte und eventuell sogar divergiert. Anscheinend hat die zunehmende Krümmung der Oberfläche einen starken Einfluss auf die Gleitlänge.

Andre Geim und seine Mitarbeiter wählen einen anderen Ansatz, um den Fluss durch Kohlenstoff-Kapillaren zu untersuchen [2]. Sie verwenden eine wohldefinierte Anzahl von Monolagen aus Graphen als Abstandshalter zwischen zwei Graphitplatten (Abb 2). Indem sie die Anzahl von Graphenlagen variieren, entstehen parallele, rechteckige Kohlenstoff-Kapillaren, die bei einer Breite von 130 nm eine Höhe bis hinunter zu einer einzelnen Atomlage haben können. Den Wasserfluss durch ihre Kanäle berechnen die Forscher aus der Verdampfungsgeschwindigkeit, indem sie das Gewicht der Probe mit einer Feinwaage bestimmen. Messungen des spannungsgetriebenen ionischen Transports und Raman-Spektroskopie belegen die durchgehende Füllung der bis zu zweihun-

dert parallelen Kanäle. Mit Hilfe von Computersimulationen ergibt sich die Gleitlänge, die unabhängig von der Anzahl der Graphenlagen etwa 60 nm beträgt. Das ist der für Graphen erwartete Wert [4].

Auf den ersten Blick widersprechen sich die beiden Resultate. Eine genauere Betrachtung zeigt aber, dass sich die Messmethoden fundamental unterscheiden und dass die Kohlenstoffatome völlig verschieden angeordnet sind [4]: einmal zylinderförmig, einmal rechteckig. Die Krümmung des Kohlenstoffgitters scheint aber eine wichtige Rolle für die Gleitlänge zu spielen. Darüber hinaus reagieren Graphen und Kohlenstoff-Nanoröhrchen sehr empfindlich auf ihre Umgebung, und die rechteckigen Kanäle bestehen an Ober- und Unterseite aus Graphit. Zudem verhält sich Wasser ähnlich komplex wie Kohlenstoff und beeinflusst die Eigenschaften der Nanostrukturen wahrscheinlich stark.

Beide Experimente führen zu noch nicht verstandenen Ergebnissen. So vergleicht Bocquet die Nanoröhrchen aus Kohlenstoff mit strukturell gleichen aus Bor-Stickstoff. Bei diesen ergibt sich aber eine Gleitlänge von Null, was vollkommen unerwartet ist (Abb 1b). Bei

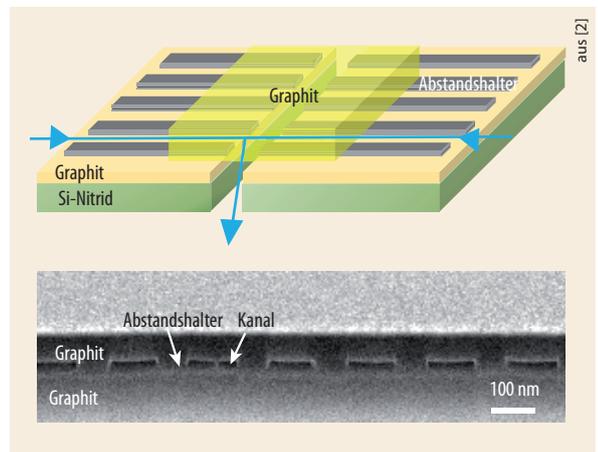


Abb. 2 Kohlenstoff-Kapillare mit einem rechteckigen Querschnitt entstehen, wenn abgezählte Lagen von Graphen den Abstand zwischen zwei Graphitplatten bestimmen.

den Kohlenstoff-Kapillaren ist der Wassertransport bei drei bis acht Graphenlagen maximal – Simulationen erklären diese Daten nur qualitativ, aber nicht quantitativ. Dennoch zeigen beide Experimente eine Vergrößerung der Gleitlänge auf mehrere 10 bis 100 nm. Die Unterschiede in der Geometrie der Versuchsanordnung geben erste Hinweise auf den Ursprung der Diskrepanz in der Gleitlänge. In beiden Fällen verringert sich der Flusswiderstand durch Verwendung von Kohlenstoff als Oberflächenmaterial.

Mögliche Anwendungen liegen im Senken des Energieverbrauchs bei der Entsalzung von Meerwasser oder umgekehrt bei der Stromerzeugung aus Salzwasser. In beiden Fällen sind möglichst kleine Kanäle mit Abmessungen im Nanometerbereich nötig. Nur bei großen Gleitlängen bleibt der Flusswiderstand gering: Nanoröhrchen oder Kapillare aus Kohlenstoff könnten die Effizienz der Prozesse erhalten.

Ulrich F. Keyser

WELTKARTE IN 3D

Die neue dreidimensionale Karte der Erde ist fertig. Metergenau zeigen sich nun die Berggipfel und Talebenen der Welt auf einen Blick. Im Rahmen der Satellitenmission TanDEM-X ist ein globales Höhenmodell entstanden, das im Vergleich zu bisherigen Datensätzen unübertroffen genau ist. Das Bild zeigt beispielsweise die „Nevada

Test Site“, die seit 1951 Schauplatz zahlreicher Atombombentests war. Das Wüstenareal 100 Kilometer nordwestlich von Las Vegas im rechten Teil des Bildes ist übersät mit Explosionskratern. (DLR)

Mehr Informationen zur Mission finden sich unter www.dlr.de/tandem-x.



- [1] E. Secchi et al., Nature 537, 210 (2016)
- [2] B. Radha et al., Nature, doi:10.1038/nature19363 (2016)
- [3] G. Hummer et al., Nature 414, 188 (2001)
- [4] S. K. Kannam et al., J. Chem. Phys. 138, 094701 (2013)
- [5] N. Laohakunakorn et al., Nano. Lett. 13, 5141 (2013).
- [6] L. Landau, C. R. Acad. Sci. URSS 43, 286 (1944); H. B. Squire, Q. J. Mech. Appl. Math. 4, 321 (1951)

Prof. Dr. Ulrich F. Keyser, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, J J Thomson Ave, Cambridge, CB3 0HE, UK