

## Silizium »out« – Kohlenstoff-Nanoröhren »in«

An der ETH Zürich entwickeln Forscher neuartige Gassensoren, basierend auf Kohlenstoff-Nanoröhren. Die nach dem chemischen FET (Feld Effekt Transistor)-Prinzip funktionierenden Sensoren könnten in Feuermeldern und der Abgasüberwachung sehr breite Anwendungsfelder erschließen.

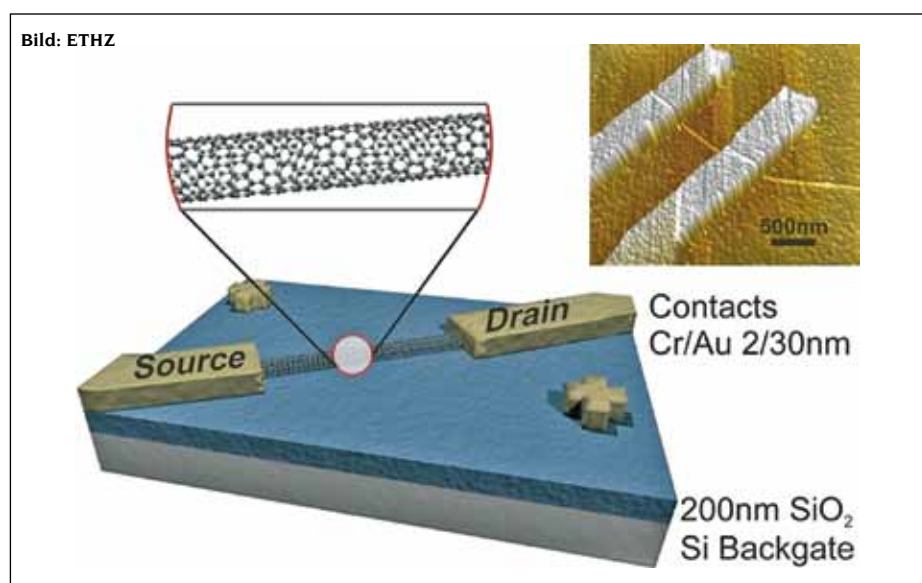
Die Siliziumtechnik stößt allmählich an ihre Leistungsgrenzen, beispielsweise in der Sensorik, weshalb Wissenschaftler in aller Welt nach Alternativen suchen. So auch an der ETH

Zürich. Christofer Hierold, Professor für Mikro- und Nanosysteme, erforscht mit Ingenieurtechnik Methoden und Prozesse, um neue Materialien und deren Eigenschaften für Sensoren

anzuwenden. Sein Schwerpunkt sind innovative Werkstoffe für mikro-/nano-elektromechanische Systeme (MEMS/NEMS), besonders Kohlenstoff-Nanoröhren.

## Vielseitige Nanoröhren

Die superkleinen CNTs (Carbon Nano Tubes) halten mehr Zugkraft aus als Stahl, leiten hervorragend Wärme und elektrischen Strom. Ihre molekulare Struktur gleicht einem aufgerollten Drahtgitter, in welchem die Atome als regelmäßiges Sechseckmuster angeordnet sind. Da sie außerordentliche elektronische Eigenschaften besitzen, eignen sie sich ideal für Transistoren in integrierten Schaltungen und für Messanwendungen in Nanosystemen. Als hoch empfindliche Sensoren mit geringem Energiebedarf könnten CNTs exzellente Dienste leisten für Anwendungen, in denen viele weit verteilte Messstellen zuverlässig und mit geringem Leistungsbedarf funktionieren sollen. Ein Beispiel dafür sind die Gebäudeautomatisierung und die Kontrolle der Raumluft, oder die Umweltanalytik. Besonders halbleitende SWNTs (single-walled carbon nanotubes) mit ihrer eindimensionalen Struktur des einwandigen »Kanals«



▲ Das an der ETHZ entwickelte Bauelement für Gassensoren basierend auf SWNTs (single-walled carbon nanotubes). Solche »Nanoröhren«-Gassensoren sind klein und hoch empfindlich, lassen sich in Raumtemperatur leistungsarm betreiben und zudem wirtschaftlich herstellen.



▲ Dr. Maximilian Fleischer im Messlabor der Siemens AG in München ist verantwortlich für die chemische Charakterisierung der Sensoren im KTI-Projekt

– Durchmesser bloß 1-2 Nanometer – reagieren sehr empfindlich auf Gase wie Stickstoffoxid (NO<sub>2</sub>) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>). Ingenieure arbeiten daran, die Empfindlichkeit auf Substanzen gezielt einzustellen, womit selbst biologische Moleküle wie Proteine registrierbar sind. Doch bisher wurde der genaue Messmechanismus von SWNT-Gassensoren, die in Nanosysteme integriert sind, nicht vollständig verstanden, denn die Ergebnisse fallen je nach

Herstelltechnik und gewählten Materialkombinationen unterschiedlich aus. In seiner Gruppe untersucht Christofer Hierold den Einfluss des Siliziumdioxid-Substrats auf die Sensoreigenschaften der Kohlenstoff-Nanoröhren. Es ist bekannt, dass das Substrat und die Anwesenheit von beispielsweise Wassermolekülen eine wesentliche Rolle für die Eigenschaften des Bauelements spielen. Letzteres ist eine ganz normale Randbedingung für einen Sensor, der in Raumluft einge-

setzt wird. »Wir haben eine Technologie entwickelt, die es uns erlaubt, aufliegende und vom Substrat freistehende CNTs vergleichend zu untersuchen«, erklärt der ETH-Professor, der sich vor allem mit CMOS-kompatiblen Mikrosystemen einen Namen gemacht hat.

»So können wir den Einfluss des Substrats vom Einfluss des zu messenden Gases trennen und eine optimierte Sensorstruktur entwickeln.«

### Schulterchluss mit starkem Partner

Der Ingenieur analysiert die Eigenschaften von SWNTs für Sensoren und nutzt dabei die Wechselwirkung der Oberfläche von Nanoröhren mit Gasmolekülen. Hand zu einer Machbarkeitsstudie bietet die Förderagentur für Innovation KTI, indem sie ein so genanntes »Discovery projects« finanziert. Damit unterstützt sie Technologievorhaben an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und Anwendung, die ein hohes Innovations- und Marktpotenzial haben, jedoch mit Risiko verbunden sind. Im Brennpunkt des Projekts stehen Design, Herstellung, Modellierung und systematische Evaluierung von Kohlenstoff-Nanoröhren für Gassensoren in Industrie und Haushalt. Mit von der Partie sind Petros Koumoutsakos, Professor für Computational Science, die Siemens Switzerland Ltd. in Zürich sowie die Siemens AG München.

Letztere stellt ihre gut ausgerüsteten Messlabors für die chemische Charakterisierung der Sensoren zur Verfügung. Dieser Kontakt kommt nicht von ungefähr, hatte doch Hierold in den 90er Jahren bei Siemens Corporate Technology in München die MEMS-Gruppe aufgebaut.

Um dem Messmechanismus auf die Spur zu kommen und die Langzeitstabilität von SWNT-Gassensoren abzuklären, entwickelte das Team eine neue Technik zur Passivierung der Bauelemente auf Grundlage einer strukturierten ALD (Atomic Layer De-



Das Projekt wird unterstützt durch die Förderagentur für Innovation KTI ([www.kti-cti.ch](http://www.kti-cti.ch)), im Rahmen ihrer »Discovery Projects«.

Damit fördert sie hoch innovative Technologievorhaben aus der Grundlagenforschung, die noch über keine Patente und Machbarkeitsstudien verfügen, jedoch bedeutendes Marktpotenzial aufweisen.

◀ Dr. Christofer Hierold, seit 2002 Professor für Mikro- und Nanosysteme an der ETH Zürich, beschäftigt sich vor allem mit Nanotransducern sowie der Entwicklung neuer Materialien für MEMS/NEMS



position) Aluminiumoxidschicht. Diese im FIRST-Lab der ETH Zürich verfügbare Prozesstechnologie ermöglicht dünne und konforme Schichten mit geringsten Defektdichten.

Zuerst passivieren die Forscher die Nanoröhren mit ALD-Aluminiumoxid und verbessern so die Stabilität der Bauelemente. Dann ätzen sie das Aluminiumoxid an definierten Stellen weg. Dies erlaubt Gasmolekülen den Zugang zu ausgewählten Stellen des Bauelements, wie beispielsweise der Kohlenstoff-Nanoröhre oder den Kontaktstellen der Nanoröhren mit metallischen Leiterbahnen.

Damit lässt sich der genaue Sensormechanismus untersuchen. Die ETH-Forscher testen die neue strukturierte Passivierungstechnik und wenden sie für die Herstellung erster SWNT-Gassensoren an.

### Kompetenzen unter einem Dach

Während das Team von Christofer Hierold sich um Sensorentwicklung, Herstellung und Charakterisierung der SWNT-Bauelemente kümmert, entwickelt die Equipe um Petros Koumoutsakos Multiscale-Modellierungen, also Berechnungsmodelle, um die Wechselwirkung zwischen Gasmolekülen und Nanoröhren zu klären. »Für Luftatmosphäre bestehend aus Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf implementieren wir Simulationsmodelle und studieren die Atmosphären-Zusammensetzung nahe der Grenzschichten«, erklärt Petros Koumoutsakos. »Wie erste Resultate zeigen, verhalten sich die verschiedenen Moleküle entsprechend ihrer atomistischen Zusammensetzung und des relativen Molekulargewichts der involvierten Moleküle.«

Positiv wirkt sich das Projekt auch auf die Lehre an der ETH Zürich aus, beispielsweise im Master Mikro- und Nanosysteme. »Für die Ausbildung zum Ingenieur ist der Praxisbezug von großer Bedeutung. Studenten, die in unserem Projekt mitarbeiten, lernen wie wichtig es ist, schon sehr früh im

Forschungs- und Entwicklungsprozess die Randbedingungen von Herstellung und Einsatz unter ‚realen Bedingungen‘ zu berücksichtigen«, betont Christofer Hierold, der sich als Forscher im Bereich der Ingenieurwissenschaften – also im Vorfeld industrieller Anwendungen – versteht. Entsprechend bleibt er stets auf Tuchfühlung mit der Industrie, lädt führende Unternehmen ein, sich den Stand der Entwicklungen in den Labors anzusehen und Kontakt mit den Studenten des Masterprogramms Mikro- und Nanosysteme aufzunehmen. Firmen wie ABB, Sensirion und Siemens zählen zu diesen Gästen, die das Ausbildungsprogramm unterstützen.

Zwar hat das KTI-Projekt erst begonnen, doch schon zeigen sich die Vorteile der SWNT gegenüber anderen Gassensorkonzepten. Dazu gehören der leistungsarme Betrieb bei Raumtemperatur, die geringe Größe und die hohe Empfindlichkeit. Und diese ist beachtlich, denn das Detektionslimit liegt unter 0,1 ppm (NO<sub>2</sub>) bei einem Energiebedarf des Sensorelements um ein Mikrowatt. Damit lassen sich kleine, leistungsfähige und energiearme Sensoren zu wirtschaftlichen Bedingungen herstellen. Neuland für die Sensorik ist in Sicht.

Infos unter [www.micro.mavt.ethz.ch](http://www.micro.mavt.ethz.ch).

#### ■ INFO

Autorin:  
Elsbeth Heinzelmann  
Journalistin Technik und Wissenschaft  
Communication Science & Technology  
Nydeggestalden 10  
3011 Bern, Schweiz  
Tel.: +41 31 311 1461  
E-Mail: [cstgmbh@bluewin.ch](mailto:cstgmbh@bluewin.ch)