

# Neuartiger Kohlenstoff-Nanoröhren-Aktor – Potenzial und Herstellung

Dr.-Ing. Torsten Koker, Forschungszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Dr.-Ing. Ulrich Gengenbach, Forschungszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer, Forschungszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

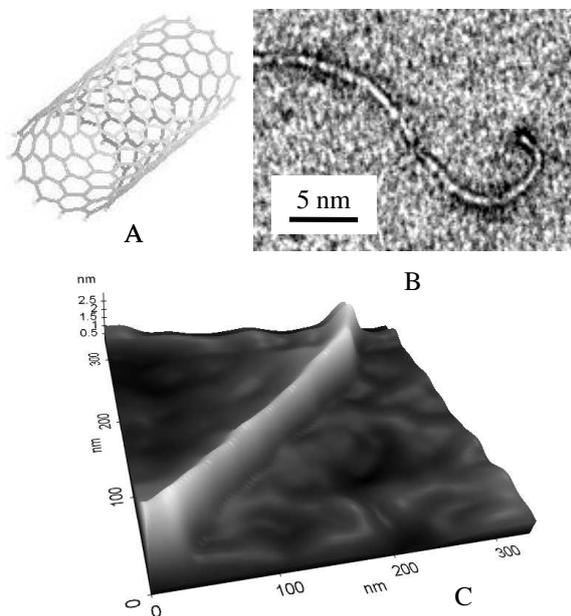
## Abstract (Novel carbon nanotube actuator – capability and fabrication)

Single-wall carbon nanotubes (SWCNTs) are molecules that possess outstanding electromechanical properties. To use these properties in macroscopic actuators many SWCNTs must be connected in series and in parallel. Theoretically, compared to a piezo actuator an elongation which is about nine times higher and comparable forces can be generated at a voltage of 0.7 V with the developed actuator concept. For the realisation of such actuators a process chain with industrial potential was designed, prototyped on the laboratory scale and tested successfully.

## 1 Kohlenstoff-Nanoröhren

### 1.1 Einführung

Perfekte SWCNTs sind nahtlose Hohlzylinder, die aus einer um die Röhrenachse aufgewickelten einatomigen Graphitschicht (Graphen) bestehen (siehe **Bild 1**). Der Durchmesser von SWCNTs beträgt typischerweise zwischen 0,6 nm und 3 nm; ihre Länge liegt üblicherweise im Mikrometerbereich.



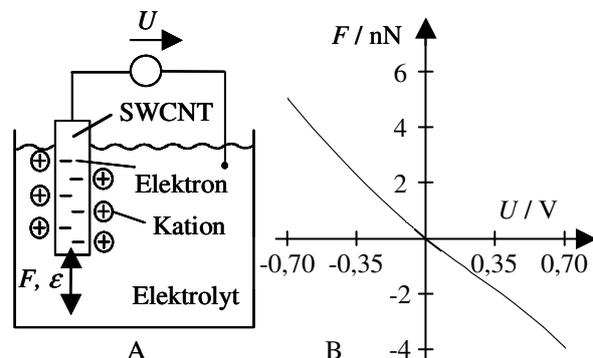
**Bild 1** SWCNTs: Schematische Darstellung (A), Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme (B), Rasterkraftmikroskopische (AFM) Aufnahme (Topografie) (C)

SWCNTs besitzen einen sehr großen Elastizitätsmodul und eine sehr hohe Zugfestigkeit. Sie sind in Abhängigkeit der Orientierung des Graphengitters relativ

zur Röhrenachse entweder metallisch leitend oder halbleitend [1]. Metallisch leitende SWCNTs, die mit zwei Metallelektroden kontaktiert sind, verhalten sich im Wesentlichen wie ohmsche Widerstände; halbleitende SWCNTs weisen eine nicht lineare Kennlinie auf.

### 1.2 Elektromechanische Eigenschaften

Befindet sich eine SWCNT in einem flüssigen Elektrolyt, so bildet sich an der Außenfläche der Nanoröhre eine elektrolytische Doppelschicht aus solvatisierten Ionen des Elektrolyten und Elektronen der SWCNT. Werden durch eine Änderung des elektrischen Potentials der SWCNT, z. B. durch Anlegen einer elektrischen Spannung  $U$ , Elektronen oder Löcher in die SWCNT injiziert, so werden die eingebrachten Ladungen durch entsprechende Ionen des Elektrolyten kompensiert (siehe **Bild 2**).



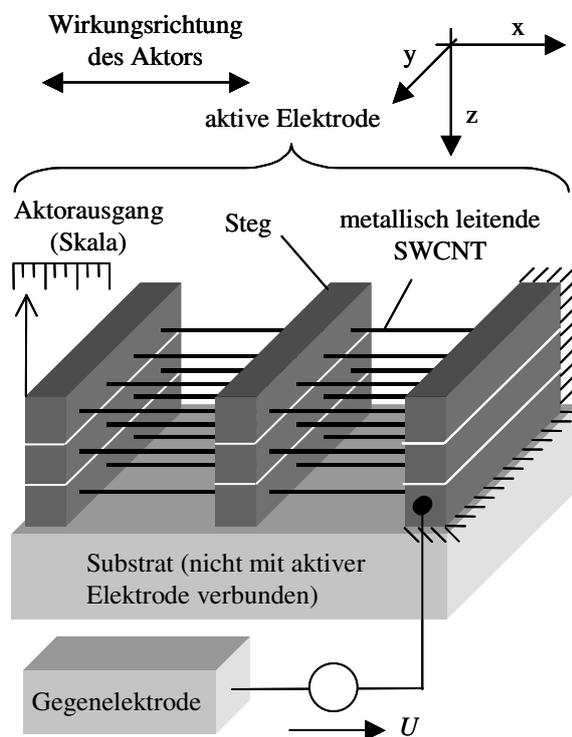
**Bild 2** Schematische Darstellung einer SWCNT mit elektrolytischer Doppelschicht in einem Elektrolyt (A), berechnete Axialkraft  $F$  einer SWCNT als Funktion der elektrischen Spannung  $U$  zwischen SWCNT und Elektrolyt (0,5 molare wässrige Kochsalzlösung) (B)

Durch diese Umladung der Doppelschicht ändert sich die Länge der kovalenten Bindungen der SWCNT, was u. a. zu einer Axialdehnung  $\varepsilon$  der SWCNT und / oder dem Aufbau einer Axialkraft  $F$  führt. Theoretisch kann eine SWCNT eine Axialdehnung von bis zu 1,5 % erreichen. SWCNTs sind daher potenziell zum Aufbau von Aktoren mit herausragenden Eigenschaften geeignet ([2], [3], [4]).

## 2 Konzept und Potenzial des Aktors

### 2.1 Konzept

Zur effizienten Nutzung der in Abschnitt 1.2 beschriebenen elektromechanischen Eigenschaften von SWCNTs wurde ein Konzept für einen Translationsaktor entwickelt. Da SWCNTs relativ kurz sind, ist es für die Realisierung technisch nutzbarer Längenänderungen eines Aktors notwendig, eine Vielzahl von SWCNTs so in Reihe zu schalten, dass sich die Längenänderungen der einzelnen SWCNTs addieren (x-Richtung in **Bild 3**, dargestellt für zwei hintereinander geschaltete SWCNT-Reihen). Darüber hinaus müssen viele SWCNTs parallel geschaltet werden, damit sich die von den SWCNTs generierten relativ geringen Axialkräfte ebenfalls addieren (y- und z-Richtung).



**Bild 3** Konzept eines Translationsaktors (vom Substrat gelöst) mit schematisch dargestellter Gegenelektrode. Der Elektrolyt und die Lagerung der Stege sind nicht dargestellt. Es sind nur drei Stege zur Veran-

schaulichung dargestellt. Die Bewegung des Aktorausgangs ist durch eine Skala symbolisiert.

Die in Wirkungsrichtung des Aktors ausgerichteten SWCNTs sind über metallische Stege elektrisch und mechanisch miteinander verbunden; die Stege müssen dabei so gelagert sein, dass sie durch die SWCNTs gegeneinander bewegt werden können. Der Verbund aus SWCNTs und Stegen bildet die aktive Elektrode des Aktors.

Diese befindet sich zusammen mit einer Gegenelektrode in einem flüssigen oder gelartigen Elektrolyt. Zum Betrieb des Aktors wird zwischen der aktiven Elektrode und der Gegenelektrode eine elektrische Spannung  $U$  angelegt. Wird nun der rechte Steg in Bild 3 fixiert, so generiert die aktive Elektrode eine Bewegung und / oder eine Kraft in x-Richtung, die am Aktorausgang abgegriffen werden kann. Die Bewegung des Aktorausgangs ist in Bild 3 schematisch durch eine Skala dargestellt. Zur Realisierung eines schnellen Aktors mit einer linearen Aktorkennlinie werden nur metallisch leitende SWCNTs für die aktive Elektrode verwendet.

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Translationsaktors wird ein Beispielaktor gewählt, dessen aktive Elektrode eine Länge von 3,8 mm (x-Richtung), eine Breite von 4,8 mm (y-Richtung) und eine Dicke von 0,8 mm (z-Richtung) aufweist. Die Breite der Stege (x-Richtung) soll  $2 \mu\text{m}$  und der Stegabstand (x-Richtung) soll  $5 \mu\text{m}$  betragen ([5], [6]).

### 2.2 Theoretische Leistungsfähigkeit

Die maximale Kraft bzw. die maximale Längenänderung des Aktors können über die in Bild 2 B dargestellte Kraft-Spannungs-Kennlinie, den Elastizitätsmodul von SWCNTs, die Anordnung der SWCNTs im Aktor und die Aktorabmessungen berechnet werden. Die Maximalkraft entspricht der Kraft des Aktors, die sich bei einem fest eingespannten Aktor und der maximal möglichen elektrischen Aktorspannung ergibt. Die maximale Längenänderung des Aktors hingegen stellt sich ein, wenn der mechanisch unbelastete Aktor mit maximaler elektrischer Spannung betrieben wird. Die maximale elektrische Spannung wird durch die elektrochemische Zersetzung des Elektrolyten (Elektrolyse) begrenzt (wässriger Elektrolyt:  $\pm 0,7 \text{ V}$ , siehe Bild 2 B). Die sich ergebenden Werte für den SWCNT-Aktor sind in **Tabelle 1** zusammengestellt. Es sind weiterhin die entsprechenden Größen eines kommerziellen Piezoaktors gleicher Abmessungen als Vergleich aufgeführt.

Gegenüber kommerziellen Piezoaktoren kann theoretisch mit dem entwickelten Aktorkonzept bei einer deutlich geringeren Betriebsspannung eine vergleichbare Kraft und eine deutlich größere Längenänderung erreicht werden. Die maximale Dehnung der aktiven Elektrode des Beispielaktors beträgt  $-0,3 \%$  /

+0,38 %; die in [3] berechnete Axialdehnung von SWCNTs von > 1 % kann u. a. aufgrund der begrenzten elektrischen Spannung nicht erreicht werden. Die Zeitkonstante des Beispielaktors liegt bei ca. 30  $\mu$ s [7].

	Beispielaktor		Piezoaktor (Fa. Piezosystem Jena GmbH)
max. Spannung $U / V$	-0,7	+0,7	160
max. Kraft in x- Richtung / N	-86	+66	-100
max. Längenänderung in x- Richtung / $\mu$ m	-14,6	+11,3	-1,6

**Tabelle 1** Berechnete Leistungsfähigkeit des Beispielaktors (Elektrolyt: 0,5 molare wässrige Kochsalzlösung) im Vergleich zu einem kommerziellen Piezoaktor mit identischen Abmessungen

## 2.3 Einsatzmöglichkeiten

Aus den elektromechanischen Eigenschaften der SWCNTs und der theoretischen Leistungsfähigkeit des Beispielaktors lassen sich verschiedene potenzielle Einsatzgebiete SWCNT-basierter Aktoren nach dem vorgestellten Konzept ableiten.

Piezoaktoren bringen häufig den Nachteil einer zu geringen maximalen Dehnung bei einer zu hohen elektrischen Ansteuerung mit sich. Diese Nachteile weist der SWCNT-Aktor nicht auf. Der vorgestellte Aktor kann somit als eine Ergänzung zur Klasse der Piezoaktoren angesehen werden. Typische Einsatzgebiete von Piezoaktoren sind die hochgenaue und schnelle Positionierung, die aktive Schwingungsdämpfung, die Tintendosierung in Tintenstrahldruckern und die Kraftstoffeinspritzung in Common-Rail-Dieselmotoren.

Aufgrund der sehr geringen notwendigen elektrischen Aktorspannung beim SWCNT-Aktor und der Funktionsfähigkeit in einem flüssigen Elektrolyt bietet dieser Aktor ein großes Potenzial für den Einsatz in biomedizinischen Anwendungen. Es ist denkbar, dass ein Nanoröhren-Aktor z. B. in aktiven Implantaten Verstärkungen ausführt [8].

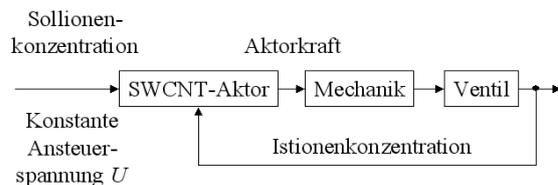
Mit dem in dieser Veröffentlichung diskutierten Aktorkonzept ist es auf einfache Weise möglich, Dünnschichtaktoren mit sehr geringen Abmessungen zu realisieren (z. B. 10  $\mu$ m x 10  $\mu$ m x 0,3  $\mu$ m). Derartige Aktoren können direkt auf einem mikrostrukturierten Chip integriert werden und dort diverse Stellfunktionen ermöglichen. Hier sind u. a. Lab-on-Chip-Systeme und mikrooptische Systeme zu nennen.

## 2.4 Ansteuerungsmöglichkeiten

Die Ansteuerung von SWCNT-Aktoren in Regelungssystemen kann auf unterschiedliche Weise geschehen. Im Folgenden werden zwei Varianten vorgestellt.

Soll ein SWCNT-Aktor z. B. zur Positionierung eines Objekts eingesetzt werden, so kann dies über eine Regelung geschehen. Es wird davon ausgegangen, dass eine derartige Regelung über einen klassischen Regelkreis mit einem PID-Regler möglich ist. Das Ansteuersignal für den Aktor ist in diesem Fall die elektrische Spannung  $U$  (siehe Bild 3), die idealerweise zwischen -0,7 V und +0,7 V liegt (siehe Tabelle 1).

Eine Ansteuerung des Nanoröhren-Aktors kann aber nicht nur über die injizierte Ladungsmenge erfolgen, die durch die Aktorspannung eingestellt wird, sondern auch über die Ionenkonzentration des Elektrolyten. Besteht z. B. die Aufgabenstellung darin, die Ionenkonzentration einer Flüssigkeit zu regeln, so kann ein SWCNT-Aktor direkt in dieser Flüssigkeit platziert werden. Wird der Aktor mit einer konstanten elektrischen Spannung betrieben, so ändert sich die Aktorkraft in Abhängigkeit der Ionenkonzentration der Flüssigkeit. Durch die Änderung der Aktorkraft kann z. B. über eine Mechanik ein Ventil angesteuert und somit die Ionenkonzentration geregelt werden (siehe Bild 4). Der SWCNT-Aktor hat dabei gleichzeitig die Funktion eines Aktors, Sensors und Reglers.



**Bild 4** Regelung der Ionenkonzentration einer Flüssigkeit über einen SWCNT-Aktor

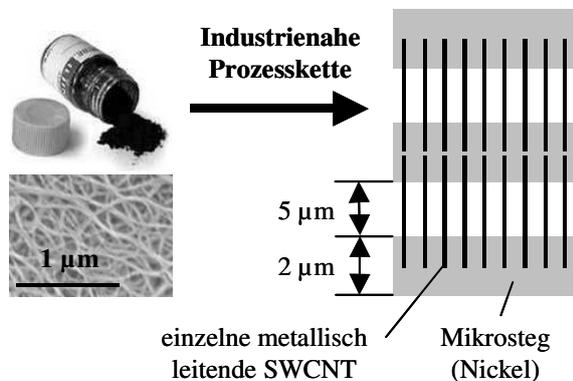
## 3 Prozesskette zur Herstellung

### 3.1 Überblick über die Prozesskette

Zum Aufbau der aktiven Elektrode des Aktors ist es notwendig, metallisch leitende und ausgerichtete SWCNTs in Mikrostrukturgittern zu integrieren und mit diesen elektrisch und mechanisch zu verbinden (siehe Abschnitt 2.1). Dies wird mit Hilfe einer industriennahen Prozesskette durchgeführt (siehe **Bild 5**).

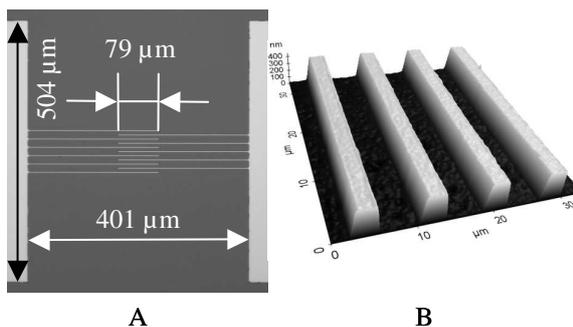
Der Ausgangspunkt der Prozesskette ist ein pulverförmiges SWCNT-Rohmaterial. In diesem Pulver liegen SWCNTs in Form von Bündeln und Verunreinigungen vor; die Bündel bestehen aus metallisch leitenden und halbleitenden SWCNTs. Im ersten Schritt der Prozesskette werden die SWCNT-Bündel über eine Suspension in einer Tensidlösung in einzelne SWCNTs aufgebrochen. Anschließend werden die vereinzelt SWCNTs in einem elektrischen Wechselfeld ausge-

richtet und metallisch leitende SWCNTs werden über Wechsellspannungsdielektrophorese auf den Stegstrukturen abgeschieden. Die Kontaktierung der abgeschiedenen SWCNTs erfolgt über eine galvanische Abscheidung von Nickel auf den Stegen. Die SWCNTs werden dadurch im Bereich der Stege in das Stegmaterial eingebaut.



**Bild 5** Überführung des SWCNT-Rohmaterials über eine industriennahe Prozesskette in eine geordnete Struktur von ausgerichteten metallisch leitenden SWCNTs (aktive Elektrode des Aktors)

Für die Entwicklung der Prozesskette wurden lithografisch hergestellte interdigitale Mikrostegestrukturen aus Nickel verwendet (siehe **Bild 6**). Im Überlappungsbereich befinden sich elf Stege mit insgesamt zehn dazwischen liegenden Spalten. Die Stege sind rechts und links mit elektrischen Zuleitungen verbunden. Die Breite der Stege beträgt ca.  $2\ \mu\text{m}$  und die der Spalte ca.  $5\ \mu\text{m}$ ; die Strukturen weisen eine Höhe von ca.  $300\ \text{nm}$  auf ([5], [7], [9]).



**Bild 6** Interdigitale Mikrostegestrukturen aus Nickel: Optisches Mikroskopbild des Überlappungsbereichs und der Zuleitungen (A), AFM-Aufnahme (Topografie) eines Teils des Überlappungsbereichs (B)

## 3.2 Beschreibung einzelner Prozessmodule

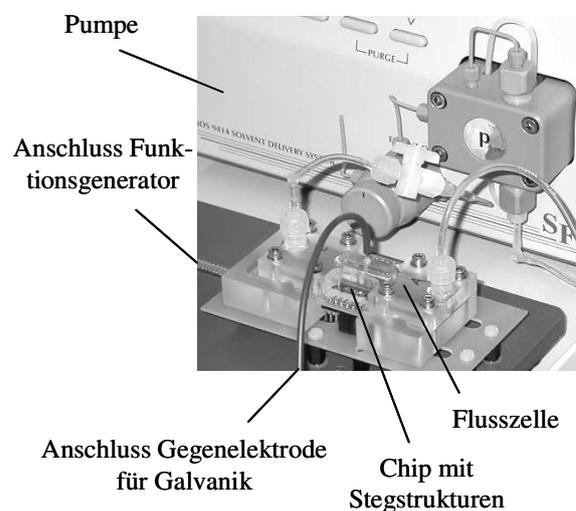
### 3.2.1 Suspendierung

Die SWCNTs liegen im Rohmaterial in Form von Bündeln vor, die aus metallisch leitenden und halbleitenden SWCNTs bestehen. Da für den Aktor nur einzelne metallisch leitende SWCNTs verwendet werden sollen, müssen die Bündel in einzelne SWCNTs aufgespalten werden. Hierzu wird das SWCNT-Rohmaterial in einer wässrigen Tensidlösung mit einem schonenden Verfahren suspendiert; als Tensid wird Natriumdodecylbenzolsulfonat verwendet. Während der Suspendierung werden die Bündel durch Eintrag von mechanischer Energie in einzelne SWCNTs aufgespalten. Die Tensidmoleküle adsorbieren auf den SWCNTs und verhindern so eine Reagglomeration der vereinzelt SWCNTs. Durch das eingesetzte schonende Verfahren zur Suspendierung hat die Mehrzahl der vereinzelt SWCNTs eine Länge von größer als  $5\ \mu\text{m}$ .

Nach der Suspendierung wird die Suspension ultrazentrifugiert. Hierbei werden Verunreinigungen und noch in der Suspension vorhandene Bündel abgetrennt. Es wird eine gereinigte Suspension erhalten, die fast ausschließlich einzelne SWCNTs enthält.

### 3.2.2 Abscheidung

Aus der Suspension, die metallisch leitende und halbleitende SWCNTs enthält, müssen ausgerichtete und metallisch leitende SWCNTs auf den interdigitalen Mikrostegestrukturen abgeschieden werden. Hierzu wird die Suspension mit einem fluidischen System über die Stegstrukturen gefördert (siehe **Bild 7**).



**Bild 7** System zur Abscheidung und Kontaktierung von metallisch leitenden SWCNTs

Durch Anlegen einer Wechsellspannung über einen Funktionsgenerator wird ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld im Überlappungsbereich der Stegstrukturen erzeugt. Die SWCNTs richten sich parallel zu den elektrischen Feldlinien aus.

Zur Abscheidung von SWCNTs auf den Stegstrukturen wird der Effekt der Wechselspannungsdielektrophorese genutzt. Hierbei bewegen sich polarisierbare Partikel in einem inhomogenen elektrischen Wechselfeld in Bereiche, in denen die elektrische Feldstärke größer oder kleiner ist. Die Bewegungsrichtung hängt dabei von der Frequenz des elektrischen Felds und den Dielektrizitätsfunktionen der Partikel und des Umgebungsmediums ab.

Die Dielektrizitätsfunktionen von suspendierten metallisch leitenden und halbleitenden SWCNTs sind unterschiedlich. Oberhalb einer Übergangsfrequenz bewegen sich daher die metallisch leitenden SWCNTs in Richtung einer größeren elektrischen Feldstärke und die halbleitenden SWCNTs in Richtung einer kleiner werdenden Feldstärke. Da die größte elektrische Feldstärke im Bereich der Kanten der Stege auftritt, werden metallisch leitende SWCNTs auf den Stegstrukturen abgeschieden; halbleitende SWCNTs bewegen sich von den Mikrostegestrukturen weg.

### 3.2.3 Kontaktierung

Die auf den Stegstrukturen aus Nickel abgeschiedenen SWCNTs müssen nun mit den Stegen elektrisch und mechanisch verbunden werden. Hierzu wird die Suspension durch einen Nickelsulfamatelektrolyt ersetzt. Durch eine Galvanik wird elementares Nickel auf den Stegstrukturen abgeschieden. Die auf den Stegen aufliegenden SWCNTs werden im Bereich der Stege in das Nickel eingebaut und somit stoffschlüssig mit diesen verbunden.

Durch eine Wärmebehandlung kann der Übergangswiderstand zwischen den SWCNTs und den Stegen weiter reduziert werden.

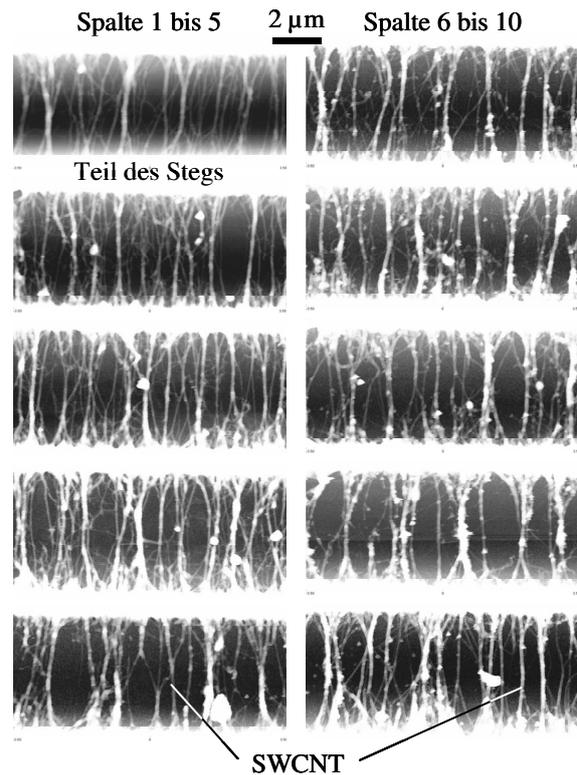
Zum Aufbau von mehreren SWCNT-Schichten in negativer z-Richtung (siehe Bild 3) können anschließend weitere metallisch leitende SWCNTs durch Wechselspannungsdielektrophorese abgeschieden und durch eine Nickelgalvanik kontaktiert werden.

## 4 Ergebnisse

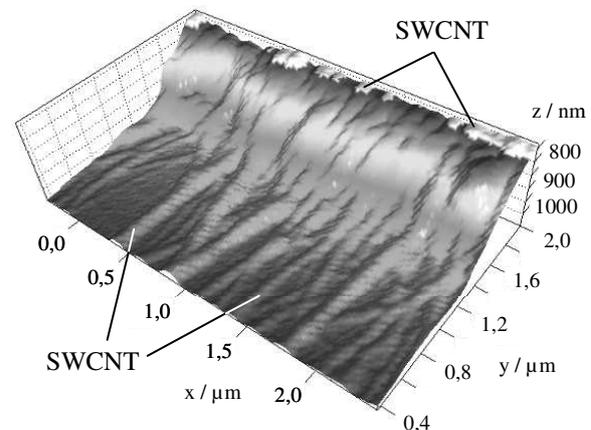
### 4.1 Abscheidung

In **Bild 8** sind AFM-Aufnahmen der zehn Spalte zwischen den Stegen mit angrenzenden Stegen dargestellt. Durch die Abscheidung können alle Stege mit metallisch leitenden SWCNTs verbunden werden. Die Verteilung der SWCNTs über der gesamten Abscheidungsfläche ist sehr homogen und die SWCNTs sind nahezu parallel zueinander und senkrecht zu den Stegen ausgerichtet (vergleiche Bilder 3 und 5).

Eine Detailaufnahme eines Spalts mit abgeschiedenen SWCNTs und angrenzendem Steg ist in **Bild 9** dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die SWCNTs auf den Stegen aufliegen [10].



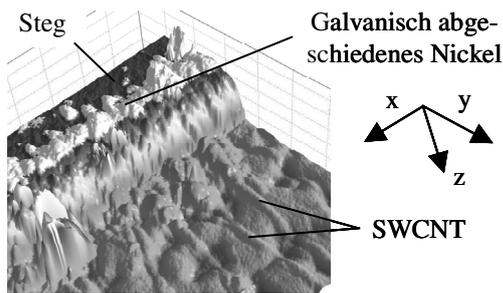
**Bild 8** AFM-Aufnahmen (Topografie) der zehn Spalte zwischen den Stegen; die Stege sind nur teilweise dargestellt



**Bild 9** 3D-AFM-Aufnahme (Topografie) eines Spalts mit angrenzendem Steg und ausgerichteten SWCNTs (unterschiedliche Skalierung der z-Achse im Vergleich zur x- bzw. y-Achse)

### 4.2 Kontaktierung

In **Bild 10** sind AFM-Aufnahmen von elektrisch und mechanisch kontaktierten SWCNTs dargestellt. Die Kontaktierung wird durch das an der Stegkante galvanisch abgeschiedene Nickel realisiert [10].



**Bild 10** 3D-AFM-Aufnahme (Topografie) eines Spalts mit angrenzendem Steg und kontaktierten SWCNTs (unterschiedliche Skalierung der z-Achse im Vergleich zur x- bzw. y-Achse)

Es konnte gezeigt werden, dass mehr als drei kontaktierte SWCNT-Schichten nacheinander auf den Stegstrukturen abgeschieden werden können. Hierdurch konnte bereits ein Teil des Aufbaus der aktiven Elektrode in negative z-Richtung (siehe Bild 3) realisiert werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Nutzung der herausragenden elektromechanischen Eigenschaften von SWCNTs wurde ein Aktorkonzept entwickelt, in dem eine Vielzahl ausgerichteter metallisch leitender SWCNTs in Reihe und parallel geschaltet ist. Die Nanoröhren sind über Stege elektrisch und mechanisch miteinander verbunden. Berechnungen zu Folge können mit dem entwickelten Konzept eine ca. 9-fach größere Längenänderung als bei einem Piezoaktor und vergleichbare Kräfte bei einer ca. 230-fach geringeren elektrischen Spannung (maximal  $\pm 0,7$  V) erreicht werden.

Die Integration der SWCNTs in die Mikrostegestrukturen kann mit einer hierfür entwickelten Prozesskette durchgeführt werden. Die industriennahe Prozesskette wurde im Labormaßstab aufgebaut. Es konnte nachgewiesen werden, dass ausgerichtete metallisch leitende SWCNTs in mehreren Schichten auf den Stegstrukturen abgeschieden werden können. Darüber hinaus können die abgeschiedenen SWCNTs über eine galvanische Abscheidung von Nickel auf den Stegen elektrisch und mechanisch kontaktiert werden.

Die Demonstration der Funktionsfähigkeit des Aktors soll im nächsten Schritt durch den Aufbau eines Funktionsmusters mit gegeneinander beweglichen Mikrostegestrukturen erfolgen [11].

Die Autoren bedanken sich bei Bundesministerium für Bildung und Forschung und beim Karlsruhe Institute of Technology (KIT) für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts. Weiterhin gilt der Dank allen Beteiligten aus den Instituten IAI, IMF, ITC-WGT,

IMT, ITG, IS, IHM, AIA und ÖA des Forschungszentrums Karlsruhe bzw. der Universität Karlsruhe (TH) und dem Institut für Mikrotechnik Mainz.

## 6 Literatur

- [1] Dresselhaus, M. S.; Dresselhaus, G.; Avouris, Ph.: Carbon Nanotubes : Synthesis, Structure, Properties, and Applications. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. – ISBN 3-540-41086-4
- [2] Baughman, R.; Cui, Ch.; Zakhidov, A.; Iqbal, Z.; Barisci, J.; Spinks, G.; Wallace, G.; Mazzoldi, A.; De Rossi, D.; Rinzler, A.; Jaschinski, O.; Roth, S.; Kertesz, M.: Carbon nanotube actuators. Science. Vol. 284, Nr. 5418, 1999, S. 1340 - 1344
- [3] Sun, G.; Kürti, J.; Kertesz, M.; Baughman, R.: Dimensional Changes as a Function of Charge Injection in Single-Walled Carbon Nanotubes. Journal of American Chemical Society. Vol. 124, Nr. 50, 2002, S. 15076 - 15080
- [4] Koker, T.; Gengenbach, U.: Concept and realization of a novel carbon nanotube actuator. 2005. – Konferenz Micro System Technologies
- [5] Koker, T.; Gengenbach, U.: Actuator based on geometrically anisotropic nanoparticles. 2005. – Patentanmeldung Nr. 2005004053 (weltweit)
- [6] Koker, T.; Gengenbach, U.; Bretthauer, G.: Concept and realization of a novel carbon nanotube actuator. 2006. – Konferenz Actuator
- [7] Koker, T.: Konzeption und Realisierung einer neuen Prozesskette zur Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren über Handhabung in technische Anwendungen. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2006. – ISBN 978-3-86644-056-2
- [8] Gengenbach, U.; Bretthauer, G.; Guthoff, R.: Künstliches Akkommodationssystem auf Basis von Mikro- und Nanotechnologie. 2005. – Mikrosystemtechnik Kongress
- [9] Koker, T.; Gengenbach, U.; Bade, K.; Seemann, K.; Peña, Z.; Bretthauer, G.: Process chain for fabrication of products containing metallic single-wall carbon nanotubes. 2006. – Ninth International Conference on the Science and Application of Nanotubes
- [10] Koker, T.; Kolew, A.; Gengenbach, U.; Bretthauer, G.: Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren in Mikrostrukturen mit Potenzial für industrielle Anwendbarkeit (INNTKA). 2008. – Schlussbericht BMBF-Projekt INNTKA (16SV3536)
- [11] Maurer, A.: Konzeption, Auslegung und Herstellung mechanischer Mikrostrukturen für ein Funktionsmuster eines Kohlenstoff-Nanoröhren-Aktors. 2007. – Diplomarbeit Universität Karlsruhe (TH)