

# Reversible Selbstorganisation von Metallchalkogenid-Metalloxid-Nanostrukturen basierend auf dem Pearson-Konzept\*\*

Jugal Kishore Sahoo, Muhammad Nawaz Tahir, Aswani Yella, Thomas D. Schladt,  
Enrico Mugnaoli, Ute Kolb und Wolfgang Tremel\*

Professor Bernd Harbrecht zum 60. Geburtstag gewidmet

Die Nanotechnologie hat ein Entwicklungsstadium erreicht, in dem nicht mehr einzelne Nanopartikel, sondern komplexe Systeme im Fokus des Interesses stehen.<sup>[1]</sup> Solche Strukturen bestehen aus zwei oder mehr unterschiedlichen Materialien, wie Metall-Halbleiter-Hybride, die die Eigenschaften beider Materialien effektiv vereinen.<sup>[2]</sup> Der Aufbau von Nanopartikeln aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen optischen, elektronischen, magnetischen oder chemischen Eigenschaften kann zu neuartigen Funktionalitäten führen, die unabhängig von den einzelnen Komponenten maßgeschneidert werden können, um spezifischen Anforderungen zu genügen. Mögliche Anwendungen liegen in Gebieten wie der Umwandlung von Solarenergie,<sup>[3]</sup> biologischen Sensoren,<sup>[4]</sup> mechanischen und optischen Bauelementen<sup>[5]</sup> sowie Methoden für Wirkstofftransport und medizinische Diagnostik.<sup>[6]</sup>

Eine besondere Herausforderung ist der Aufbau von hierarchischen Strukturen aus einzelnen Nanopartikeln. Nanoröhren (NT-MQ<sub>2</sub>)<sup>[7]</sup> und Zwiebelschalen-Fullerene (IF-MQ<sub>2</sub>)<sup>[8]</sup> aus schichtförmigen Metallchalkogeniden sind die anorganischen Analoga zu Kohlenstoffnanoröhren und -fullerenen. Sie haben teilweise auch vergleichbare mechanische<sup>[9]</sup> und elektronische Eigenschaften.<sup>[10]</sup> Ihre physikalischen Eigenschaften<sup>[11]</sup> lassen sich aufgrund ihrer Kristallstruktur verstehen. Die MQ<sub>2</sub>-Schichten werden lediglich

durch Van-der-Waals-Wechselwirkungen zusammengehalten. Die sterische Abschirmung der Metallatome durch die Chalkogenschichten schützt vor einem nukleophilen Angriff durch Sauerstoff oder organische Liganden und bedingt so die hohe Reaktionsträgheit und schlechte Funktionalisierbarkeit.

Durch den Einsatz chalkophiler Übergangsmetalle in Kombination mit mehrzähligen Oberflächenliganden wurden erhebliche Fortschritte erzielt: Die 3d-Metalle „besetzen“ die Schwefeloberfläche der Chalkogenidnanopartikel, während der mehrzählige Ligand die Koordinationsosphäre der Metallatome nach außen hin blockiert. Diese Abschirmung verhindert eine Vernetzung der Chalkogenidnanopartikel.<sup>[12]</sup>

Die Fähigkeit, Aggregate aus unterschiedlichen Nanopartikeln zu bilden, hängt von der chemischen Modifizierbarkeit der Partikeloberfläche unter Bildung spezifischer Bindungen ab. Ein difunktionelles organisches Verknüpfungsmolekül mit spezifischen Ankergruppen für jeweils beide Arten von Nanopartikeln wird zunächst mit einer seiner Ankergruppen an die Oberfläche der einen Partikel sorte gebunden. Anschließend wird die zweite Ankergruppe für die Anbindung der anderen Partikelkomponente genutzt.<sup>[13]</sup>

Das Ziel ist dabei die Anbindung einer definierten Zahl an Ligandenmolekülen bei gleichzeitiger Vermeidung der Aggregation durch unspezifische Wechselwirkungen mit Oberflächen und anderen Partikeln in Lösung. Dazu müssen die Nanopartikel mit einer Schutzhülle stabilisiert werden, die gleichzeitig chemische Ankerpunkte für die Modifizierung enthält. Diese kovalente chemische Anbindung gewährleistet eine hohe Stabilität in verschiedenen Lösungsmitteln und in Gegenwart von Ionen. Die gegenwärtigen Strategien für die Funktionalisierung von Nanopartikeln beruhen 1) auf der nichtkovalenten Physisorption von Linker-Molekülen auf der Partikeloberfläche,<sup>[14]</sup> 2) auf der elektrostatischen Anlagerung einer zusätzlichen Polymerschicht<sup>[15]</sup> oder 3) auf kurzen difunktionellen Konnektoren. Diese Verfahren führen in der Regel zu geringen Ausbeuten<sup>[16]</sup> oder geringen Oberflächenbedeckungen.<sup>[17]</sup>

Alternativ können Nanopartikel durch nasschemische Synthesemethoden direkt auf Nanoröhren aufgebracht werden.<sup>[18]</sup> Kolloidale Nanopartikel könnten aufgrund ihrer Säure/Base-Eigenschaften, ihrer funktionellen Gruppen oder ihrer Pearson-Härte<sup>[19]</sup> eine Bindungsaffinität hinsichtlich der Nanoröhrenoberfläche aufweisen, sodass eine Anbindung ohne die Hilfe von Linker-Molekülen möglich würde.

[\*] J. K. Sahoo, Dr. M. N. Tahir, Dr. A. Yella, T. D. Schladt,

Prof. Dr. W. Tremel

Institut für Anorganische Chemie und Analytische Chemie

Johannes Gutenberg-Universität

Duesbergweg 10–14, 55099 Mainz (Deutschland)

Fax: (+49) 6131-39-25605

E-Mail: tremel@uni-mainz.de

Dr. E. Mugnaoli, Dr. U. Kolb

Institut für Physikalische Chemie

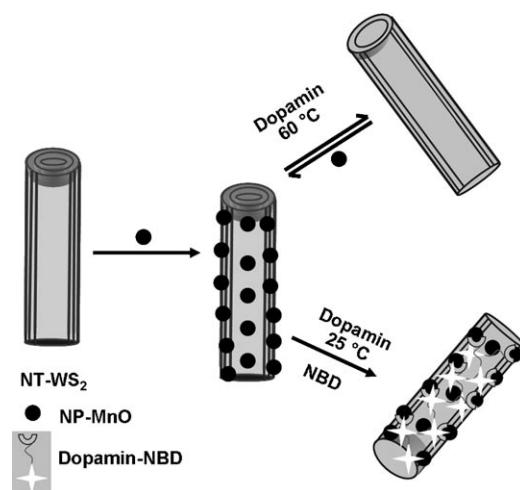
Johannes Gutenberg-Universität

Welderweg 11, 55099 Mainz (Deutschland)

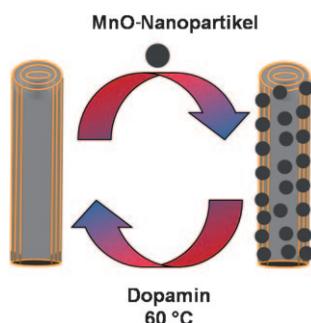
[\*\*] Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1165 „Nanoröhre und Nanoröhren: von kontrollierter Synthese zur Funktion“ durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt (Förderprogrammtitel: „Von einzelnen Molekülen zu nanoskopisch strukturierten Materialien“). A.Y. dankt POLYMAT, der Graduiertenschule der Exzellenz des Landes Rheinland-Pfalz für ein Stipendium. T.D.S. wurde durch ein Stipendium der Carl-Zeiss-Stiftung unterstützt. Wir danken dem Center for Complex Matter (COMATT) für die Förderung des Elektronenmikroskopiezentrums in Mainz (EZMZ).

Hintergrundinformationen zu diesem Beitrag sind im WWW unter <http://dx.doi.org/10.1002/ange.201000774> zu finden.

Hier stellen wir eine neue Strategie auf der Basis des HSAB-Prinzips von Pearson<sup>[19c]</sup> vor, welche die Bildung hierarchischer Metallchalkogenid-Metallocid-Nanostrukturen ermöglicht. Die Metallocidpartikel können anschließend zur Modifizierung der Chalkogenidoberfläche selektiv bei Raumtemperatur funktionalisiert oder mit einem Ligandenüberschuss reversibel von der Oberfläche abgelöst werden (Schema 1). Die regenerierten Chalkogenidnanopartikel können ihrerseits ohne den Einsatz organischer Liganden erneut verwendet werden (Schema 2).

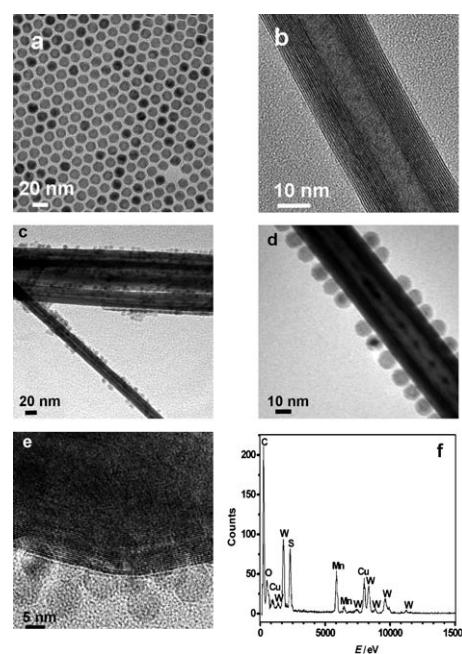


**Schema 1.** Reversible Fixierung von MnO-Nanopartikeln auf NT-WS<sub>2</sub> und Oberflächenfunktionalisierung durch fluorophormarkiertes Dopamin.



**Schema 2.** Reversible Funktionalisierung von WS<sub>2</sub>-Nanoröhren mit MnO-Nanopartikeln.

Nach Pearsons HSAB-Prinzip hat eine harte oder weiche Lewis-Säure das Bestreben, an eine harte bzw. weiche Lewis-Base zu binden.<sup>[19c]</sup> Folglich hat die weiche Schwefelschicht in den schichtförmigen Metallchalkogeniden eine starke Tendenz zur Bindung an Nanopartikel, die weiche Übergangsmetallionen enthalten. Als Grundbausteine für diese Nano-hybride wurden daher MnO-Nanopartikel (MnO-NP) und WS<sub>2</sub>-Nanoröhren (NT-WS<sub>2</sub>) gewählt, die zunächst einzeln nach publizierten Verfahren hergestellt wurden.<sup>[20]</sup> Abbildung 1 zeigt repräsentative TEM-Aufnahmen beider Bausteine. Syntheseebedingt sind die MnO-Nanopartikel von einer Ölsäure-Schutzhülle umgeben und daher leicht löslich



**Abbildung 1.** TEM-Aufnahmen von a) MnO-Nanopartikeln, b) NT-WS<sub>2</sub>. c-e) Anbindung der MnO-Nanopartikel auf die Oberfläche der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren. c) Übersichtsbild (TEM-Aufnahme), d,e) HRTEM-Aufnahmen der Grenzfläche von MnO-Nanopartikeln und den Röhrenwänden (d) oder der Spitze (e) der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren. f) EDX-Spektrum des MnO@NT-WS<sub>2</sub>-Kompositen.

in unpolaren organischen Lösungsmitteln wie Cyclohexan, Toluol oder THF.<sup>[20a]</sup> Die WS<sub>2</sub>-Nanoröhren werden dagegen durch Sulfidierung von WO<sub>3</sub>-Nanokristallen im Anschluss an deren Hydrothermalsynthese hergestellt.<sup>[20b]</sup> Eine hochaufgelöste (HR)TEM-Aufnahme einer solchen WS<sub>2</sub>-Nanoröhre ist in Abbildung 1b dargestellt. Der Schichtabstand von 0.65 nm zwischen den Röhrenwänden stimmt mit dem (002)-Netzebenenabstand des 2H-WS<sub>2</sub>-Gitters überein.

Die Oxid-Chalkogenid-Nanostrukturen wurden durch Vermischen von Dispersionen der beiden Materialien in Toluol und anschließendes mechanisches Schütteln zusammengefügt. Ein Austausch der Ölsäuremoleküle auf der Oberfläche der Metallocidnanopartikel gegen die Schwefelatome auf der Oberfläche der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren führt zur Bildung geordneter Schichten von Oxidpartikeln auf den Chalkogenidnanoröhren. Die erfolgreiche Anbindung der MnO-Nanopartikel ist in den TEM-Aufnahmen in Abbildung 1c-e erkennbar und wurde durch EDX-Analyse bestätigt (Abbildung 1f). Für eine erfolgreiche Chemisorption von Ionen oder Molekülen muss deren Acidität/Basizität zu denjenigen der Oberflächenplätze „passen“. Das Übersichtsbild in Abbildung 1c zeigt, dass fast alle Nanoröhren von MnO-Nanopartikeln bedeckt sind, darüber hinaus bestätigt die HRTEM-Aufnahme in Abbildung 1e, dass annähernd alle Nanopartikel auf der Basisfläche der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren angeordnet sind. Einen weiteren Überblick über die gelungene Fixierung von MnO auf NT-WS<sub>2</sub> liefert die rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme in Abbildung S1 (siehe die Hintergrundinformationen). Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) an den Nanokompositröhren

(Abbildung 1 f) belegt das Auftreten der Elemente W, S, Mn und O. In Übereinstimmung mit den TEM-Ergebnissen deuten die Analyseergebnisse auf eine erhebliche Menge an MnO-Nanopartikeln auf der Oberfläche der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren hin.

Wie bereits erwähnt, bedarf es geeigneter Strategien zur effizienten Funktionalisierung von Chalkogenidoberflächen, während sich Metalloxidoberflächen vergleichsweise leicht modifizieren lassen. Daher bieten die oberflächengebundenen MnO-Nanopartikel eine elegante Möglichkeit der indirekten WS<sub>2</sub>-Funktionalisierung. Beim Zusatz von Catecholliganden werden die schützenden Ölsäuremoleküle beispielsweise durch freie Catechole ersetzt.

In Abbildung 2a vergleichen wir die UV/Vis-Spektren von MnO@NT-WS<sub>2</sub>-Nanokompositen (schwarze Linie) sowie MnO@NT-WS<sub>2</sub>, deren MnO-Domänen mit 7-Nitrobenzo-

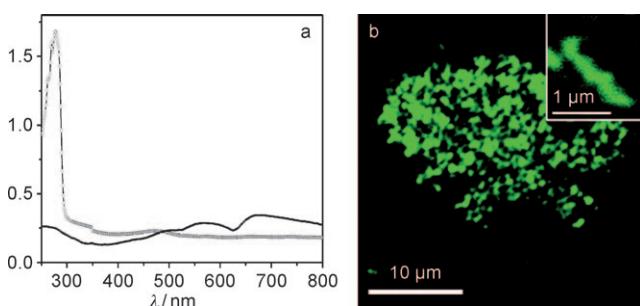
macht werden. Eine Kontrolluntersuchung mit nichtfunktionalisierten MnO-Nanopartikeln und WS<sub>2</sub>-Nanoröhren zeigte keine Fluoreszenz.

Pearsons HSAB-Prinzip besagt, dass, aufgrund ihrer thermodynamischen und kinetischen Eigenschaften, harte Säuren bevorzugt mit harten Basen und weiche Säuren bevorzugt mit weichen Basen koordinieren. Allerdings muss für ein korrektes Verständnis des HSAB-Prinzips die Solvatisierung der Ionen berücksichtigt werden. Da Catechole stabile Chelatkomplexe bilden, können sie erfolgreich mit den Oberflächen-Schwefelatomen um die Bindung an die 3d-Metallatome konkurrieren. Da das Solvatisierungsvermögen mit steigender Temperatur zunimmt, können oberflächengebundene MnO-Nanopartikel bei 60°C von der WS<sub>2</sub>-Oberfläche entfernt werden.

Die Valenztautomerie redoxaktiver Catecholliganden an Metallatomen stellt einen weiteren wichtigen Grund für die Stabilität der Catecholkomplexe auf der Oberfläche dar. Diese Liganden bilden über ihre negativ geladenen Sauerstoffatome ungespannte und ungesättigte fünfgliedrige Ringe mit den Oberflächen-Metallatomen. Komplexe mit solchen Liganden zeigen häufig einen reversiblen intramolekularen Elektronentransfer, der zu einer zusätzlichen Stabilisierung durch interne Ladungsumverteilung führt (Schema S2).<sup>[21]</sup>

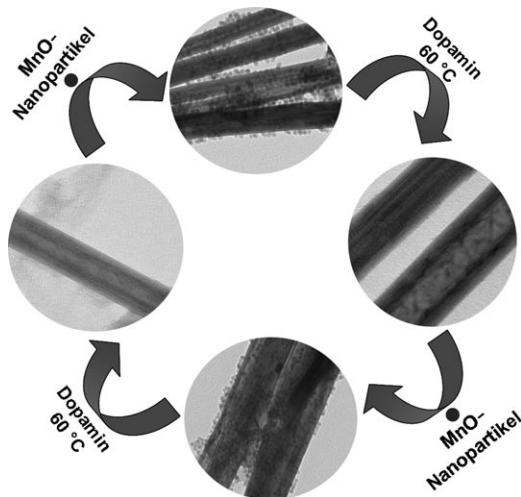
Schema 2 illustriert die reversible Anbindung und Ablösung von MnO-Nanopartikeln auf der Oberfläche der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren. Während Oxide von weichen Metallen und Metallen an der Grenze zwischen hartem und weichem Verhalten leicht durch Chemisorption an Oberflächen-Schwefelatome gebunden werden, haben harte Metalle eine geringere Tendenz zur Bindung. Dagegen binden Catecholliganden sehr effizient an harte Metalle und „Grenzfälle“ wie Ti<sup>4+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> (hart) und Mn<sup>2+</sup>. Folglich ist die Anbindung von Chalkogenidnanopartikeln und Catecholliganden an Oberflächen-Metallatome von Oxiden der Metalle im Grenzbereich von hart und weich eine dynamische Gleichgewichtsreaktion, deren Lage von den Reaktanten und der Temperatur abhängt. Durch Erhöhung der Reaktionstemperatur auf 60°C wird Dopamin zum bevorzugten Oberflächenliganden für die MnO-Nanopartikel. Es verdrängt die Schwefelatome von NT-WS<sub>2</sub>, und nichtfunktionalisierte WS<sub>2</sub>-Nanoröhren bleiben zurück. Bei der erneuten Zugabe von frischen MnO-Nanopartikeln zu NT-WS<sub>2</sub> werden die Ölsäuremoleküle auf der Metalloxidoberfläche teilweise durch Schwefelatome der Nanoröhren ersetzt, sodass es zur erneuten Anlagerung von MnO an NT-WS<sub>2</sub> kommt. Dieser Zyklus kann problemlos mehrere Male wiederholt werden; die Chalkogenidpartikel können folglich wiederverwendet werden (Schema 3).

Die Kernaussagen des HSAB-Modells beziehen sich auf die Bindungsstärke. Es wird auf Systeme angewendet, in denen kinetische Kontrolle, Entropie der Adduktbildung, Solvatisierungseffekte (enthalpisch und entropisch), Ionenpaarungseffekte (enthalpisch und entropisch) oder Gitterenergieeffekte (enthalpisch und entropisch) die Hauptfaktoren sind. Wenn HSAB-Erwägungen herangezogen werden, setzen wir voraus, dass (kovalente) Weich-weich- oder (ioni- sche) Hart-hart-Wechselwirkungen die chemischen Prozesse diktieren, d.h. die Reaktionen sind entweder orbital- oder ladungskontrolliert.<sup>[22]</sup>



**Abbildung 2.** a) UV/Vis-Absorptionsspektrum von WS<sub>2</sub>-Nanoröhren (schwarze Linie) und MnO@NT-WS<sub>2</sub>-Nanokompositen funktionalisiert mit NBD (graue Linie/○). b) Konfokale lasermikroskopische Aufnahme von WS<sub>2</sub>-Nanoröhren bedeckt mit NBD-funktionalisierten MnO-Nanopartikeln. Der Einschub zeigt eine einzelne Nanoröhre. Die Abbildung erfolgte mit einem 40×-Ölimmersionsobjektiv (NA 1.25).

furazan-funktionalisierten Dopamin (NBD) modifiziert wurden (graue Linie/○). Die charakteristische breite Absorption der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren bei 660 nm ist im Spektrum der nichtfunktionalisierten Nanokomposite deutlich sichtbar, während sie in der NBD-modifizierten Probe schwer zu erkennen ist. Dafür erscheint ein zusätzliches Absorptionsmaximum bei 490 nm, das auf den Farbstoff zurückzuführen ist, sowie ein ausgeprägtes Maximum bei 280 nm, das sich durch die Anregung des Phenylrings von Dopamin erklären lässt. Zusätzlich konnte die Anbindung von NBD-funktionalisierten MnO-Nanopartikeln auf die WS<sub>2</sub>-Oberfläche durch konfokale Lasermikroskopie bestätigt werden (Abbildung 2b). Dazu wurde zunächst ein 10-µL-Tropfen der Probe in THF auf einen Glasobjekträger gebracht, und anschließend wurde das Lösungsmittel verdampft. Der Fluoreszenzfarbstoff wurde bei 514 nm angeregt, und die Emission zwischen 520 und 540 nm wurde detektiert. Das Übersichtsbild der NBD-modifizierten MnO@NT-WS<sub>2</sub>-Nanokomposite in Abbildung 2b zeigt beinahe isolierte, anisotrope, fluoreszierende Partikel. Anhand dieses Fluoreszenzbilds gehen wir davon aus, dass die Oberfläche der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren vollständig mit NBD-funktionalisierten MnO-Nanopartikeln bedeckt ist. Aufgrund der optischen Auflösung des Mikroskops können keine genauen Angaben zur Größe der Nanokomposite ge-



**Schema 3.** Reversible Fixierung von MnO-Nanopartikeln auf WS<sub>2</sub>-Nanoröhren und Oberflächenfunktionalisierung durch fluoreszenzmarkiertes Dopamin.

Zusammenfassend haben wir die Prinzipien der Koordinationschemie genutzt, um höchst inerte Chalkogenidnanoröhren (WS<sub>2</sub>) mit Metalloxidnanopartikeln (MnO) reversibel zu funktionalisieren. Unsere Modifizierungsstrategie beruht auf Pearsons HSAB-Konzept und der Chalkophilie von Mn<sup>2+</sup>. Die oberflächengebundenen Nanopartikel sind darüber hinaus weiterhin für eine Funktionalisierung mit Dopamin zugänglich. Weil Dopamin mit 3d-Metallatomen stärkere Komplexe bildet als die Oberflächen-Schwefelatome der Chalkogenidnanoröhren, können die MnO-Nanopartikel bei leicht erhöhter Temperatur von der Nanoröhrenoberfläche abgelöst werden. Zugabe von frischen MnO-Nanopartikeln führt daraufhin zur erneuten Funktionalisierung der WS<sub>2</sub>-Nanoröhren mit MnO.

Dieses selbstorganisierte Hybridnanokomposit kann verschiedene selektive Nanopartikel-Substrat-Wechselwirkungen einbinden, die auf bekannten oberflächenchemischen Prozessen beruhen. Es kann außerdem für Schichtchalkogenide und weitere Übergangsmetall- oder Hauptgruppenelementoxide verallgemeinert werden. Außerdem bietet das Verfahren einen preiswerten Zugang zu den Produkten unter Bildung geringer Abfallmengen – Schlüsseleigenschaften in der Entwicklung „grüner“ Nanoherstellungsstrategien.

Die Funktionalisierung von WS<sub>2</sub>-Nanoröhren eröffnet auch dieser Materialklasse nun einige Anwendungsgebiete, die in den vergangenen Jahren für die verwandten Kohlenstoffnanoröhren und verschiedene Oxidmaterialien intensiv erforscht wurden: 1) die Funktionalisierung von Chalkogenidnanoröhren für die Anbindung elektronisch aktiver Komponenten (Metall- und Halbleiternanopartikel, Antennenkomplexe für Solarzellen) an die Röhrenwände, 2) Dispersion der Nanoröhren, etwa zur Einführung in Komposite, für die sie wegen ihrer außerordentlichen mechanischen Eigenschaften von großem Interesse sind. 3) Zusätzlich lassen sich durch die Bindung von Chalkogenidpartikeln an Oxidoberflächen sehr dünne Filme herstellen, die einen Einsatz als Schmiermittel zwischen ansonsten inkompatiblen keramischen Materialien möglich machen.

Eingegangen am 8. Februar 2010,  
veränderte Fassung am 26. April 2010  
Online veröffentlicht am 16. August 2010

**Stichwörter:** Chalkogenide · HSAB-Prinzip · MnO-Nanopartikel · Oberflächenfunktionalisierung · WS<sub>2</sub>-Nanoröhren

- [1] a) P. D. Cozzoli, T. Pellegrino, L. Manna, *Chem. Soc. Rev.* **2006**, *35*, 1195; b) H. Zeng, S. Sun, *Adv. Funct. Mater.* **2008**, *18*, 391; c) J. A. McGuire, J. Joo, J. M. Pietryga, R. Schaller, V. I. Klimov, *Acc. Chem. Res.* **2008**, *41*, 1810.
- [2] a) V. Subramanian, E. E. Wolf, P. V. Kamat, *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 7479; b) T. Mokari, E. Rothenberg, I. Popov, R. Costi, U. Banin, *Science* **2004**, *304*, 1787; c) T. Mokari, C. G. Sztrum, A. Salant, E. Rabani, U. Banin, *Nat. Mater.* **2005**, *4*, 855; d) D. V. Talapin, H. Yu, E. V. Shevchenko, A. Lobo, C. B. Murray, *J. Phys. Chem. C* **2007**, *111*, 14049; e) J. Yang, H. I. Elim, Q. Zhang, J. Y. Lee, W. Ji, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 11921.
- [3] A. Rizzo, C. Nobile, M. Mazzeo, M. De Giorgi, A. Fiore, L. Carbone, R. Cingolani, L. Manna, G. Gigli, *ACS Nano* **2009**, *3*, 1506.
- [4] a) K. Sudeep, S. T. S. Joseph, K. G. Thomas, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 6516; b) X. Huang, I. H. El-Sayed, W. Qian, M. A. El-Sayed, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 2115.
- [5] a) M. Thomalla, H. Tributsch, *J. Phys. Chem. B* **2006**, *110*, 12167; b) J.-P. Salvat, J.-M. Bonard, N. H. Thomson, A. J. Kulik, L. Forrò, W. Benoit, L. Zuppiroli, *Appl. Phys. A* **1999**, *69*, 255.
- [6] a) I. Gorelikov, L. M. Field, E. Kumacheva, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 15938; b) A. K. Salem, P. C. Searson, K. W. Leong, *Nat. Mater.* **2003**, *2*, 668; c) M. I. Shukoor, F. Natalio, P. Gupta, M. N. Tahir, H. A. Therese, S. Weber, S. Fischer, N. Metz, P. Theato, L. M. Schreiber, H. C. Schröder, W. E. G. Müller, W. Tremel, *Adv. Funct. Mater.* **2009**, *19*, 3717.
- [7] a) L. Margulis, G. Salitra, R. Tenne, M. Talianker, *Nature* **1993**, *365*, 113; b) A. Yella, E. Mugnaioli, M. Panthöfer, H. A. Therese, U. Kolb, W. Tremel, *Angew. Chem.* **2009**, *121*, 6546; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 6426.
- [8] a) Y. Feldman, E. Wasserman, D. J. Srolovitz, R. Tenne, *Science* **1995**, *267*, 222; b) R. Tenne, M. Homyonfer, Y. Feldman, *Chem. Mater.* **1998**, *10*, 3225; c) W. Tremel, *Angew. Chem.* **1999**, *111*, 2311; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, *38*, 2175.
- [9] a) Y. R. Hacohen, E. Grunbaum, R. Tenne, J. Sloan, J. L. Hutchison, *Nature* **1998**, *395*, 336; b) A. Q. Zhu, T. Sekine, Y. H. Li, W. X. Wang, M. Y. Fay, H. Edwards, P. D. Brown, N. Fleischer, R. Tenne, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 1500; c) I. Kaplan-Ashiri, S. R. Cohen, K. Gartsman, R. Rosentsveig, V. Ivanovskaya, T. Heine, G. Seifert, H. D. Wagner, R. Tenne, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2006**, *103*, 523.
- [10] a) L. Scheffer, R. Rosentzveig, A. Margolin, R. Popovitz-Biro, G. Seifert, S. R. Cohen, R. Tenne, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2002**, *4*, 2095; b) M. Nath, S. Kar, A. K. Raychaudhuri, C. N. R. Rao, *Chem. Phys. Lett.* **2003**, *368*, 690.
- [11] a) F. Hulliger, *Structural Chemistry of the Layer-Type Phases* (Hrsg.: F. Levy), Reidel, **1976**; b) A. Katz, M. Redlich, L. Rapoport, H. D. Wagner, R. Tenne, *Tribol. Lett.* **2006**, *21*, 135.
- [12] a) M. N. Tahir, M. Eberhardt, N. Zink, H. A. Therese, U. Kolb, P. Theato, W. Tremel, *Angew. Chem.* **2006**, *118*, 4927; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 4809; b) M. N. Tahir, N. Zink, M. Eberhardt, H. A. Therese, U. Kolb, P. Theato, W. Tremel, *Small* **2007**, *3*, 829; c) M. N. Tahir, M. Eberhardt, P. Theato, S. Faiß, A. Janshoff, T. Gorelik, U. Kolb, W. Tremel, *Angew. Chem.* **2006**, *118*, 922; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 908; d) M. N. Tahir, M. Eberhardt, H. A. Therese, U. Kolb, P. Theato, W. E. G. Mueller, H. C. Schroeder, W. Tremel, *Angew. Chem.* **2006**, *118*, 4921; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 4803; e) M. N. Tahir, F. Natalio, H. A. Therese, A. Yella, N. Metz, M. R. Shah, E. Mugnaioli, R.

- Berger, P. Theato, H. C. Schroeder, W. E. G. Müller, W. Tremel, *Adv. Funct. Mater.* **2009**, *19*, 285; f) M. N. Tahir, A. Yella, H. A. Therese, E. Mugnaioli, M. Panthöfer, H. U. Khan, W. Knoll, U. Kolb, W. Tremel, *Chem. Mater.* **2009**, *21*, 5382.
- [13] a) I. Robel, B. A. Bunker, P. V. Kamat, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 2458; b) S. Banerjee, S. S. Wong, *Nano Lett.* **2002**, *2*, 195; c) L. Sheeney-Haj-Ichia, B. Basnar, I. Willner, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 80; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 78.
- [14] D. Spetzler, J. York, D. Daniel, R. Fromme, D. Lowry, W. Frasch, *Biochemistry* **2006**, *45*, 3117.
- [15] A. Gole, C. J. Murphy, *Langmuir* **2005**, *21*, 10756.
- [16] B. F. Pan, L. M. Ao, F. Gao, H. Y. Tian, R. He, D. X. Cui, *Nanotechnology* **2005**, *16*, 1776.
- [17] a) J. Y. Chang, H. Wu, H. Chen, Y. C. Ling, W. Tan, *Chem. Commun.* **2005**, 1092; b) K. K. Caswell, J. N. Wilson, U. H. F. Bunz, C. J. Murphy, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 13914; c) A. K. Salem, M. Chen, J. Hayden, K. W. Leong, P. C. Searson, *Nano Lett.* **2004**, *4*, 1163.
- [18] a) M. Olek, T. Busgen, M. Hilgendorff, M. Giersig, *J. Phys. Chem. B* **2006**, *110*, 12901; b) S. Banerjee, S. S. Wong, *Chem. Commun.* **2004**, 1866; c) B. H. Juárez, C. Klinke, A. Kornowski, H. Weller, *Nano Lett.* **2007**, *7*, 3564; d) Y. J. Na, H. S. Kim, J. J. Park, *J. Phys. Chem. C* **2008**, *112*, 11218.
- [19] a) R. G. Pearson, *J. Am. Chem. Soc.* **1963**, *85*, 3533; b) R. G. Pearson, *Chemical Hardness. Applications from Molecules to Solids*, Wiley-VCH, Weinheim, **1997**; c) F. Umland, G. Wünsch, *Charakteristische Reaktionen Anorganischer Stoffe*, 2. Aufl., Aula Verlag, Wiesbaden, **1991**.
- [20] a) T. D. Schladt, T. Graf, W. Tremel, *Chem. Mater.* **2009**, *21*, 3183; b) H. A. Therese, J. Li, U. Kolb, W. Tremel, *Solid State Sci.* **2005**, *7*, 67; c) J. Etzkorn, H. A. Therese, F. Rocker, N. Zink, U. Kolb, W. Tremel, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 2372.
- [21] a) Die betreffende Valenztautomerie wurde ausgiebig für molekulare Verbindungen untersucht. Erstens stellen sie einzigartige Modellsysteme dar, die Einsicht in die prinzipiellen Faktoren des intramolekularen Elektronentransfers von Koordinationskomplexen geben, und zweitens bieten die großen Veränderungen in den optischen, strukturellen und magnetischen Eigenschaften, welche eine Valenztautomerie oftmals mit sich bringt, vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in bistabilen molekularen Schaltern und Funktionseinheiten; b) C. G. Pierpont, C. W. Lange, *Prog. Inorg. Chem.* **1994**, *41*, 331; c) P. Gütlich, A. H. Hauser, H. Spiering, *Angew. Chem.* **1994**, *106*, 2109; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1994**, *33*, 2024.
- [22] a) G. Klopman, *J. Am. Chem. Soc.* **1968**, *90*, 223; b) L. Salem, *J. Am. Chem. Soc.* **1968**, *90*, 543; c) L. Salem, *J. Am. Chem. Soc.* **1968**, *90*, 553; d) M. Klessinger, *Elektronenstruktur organischer Moleküle: Grundbegriffe quantenchemischer Betrachtungsweisen*, Verlag Chemie, Weinheim, **1982**.