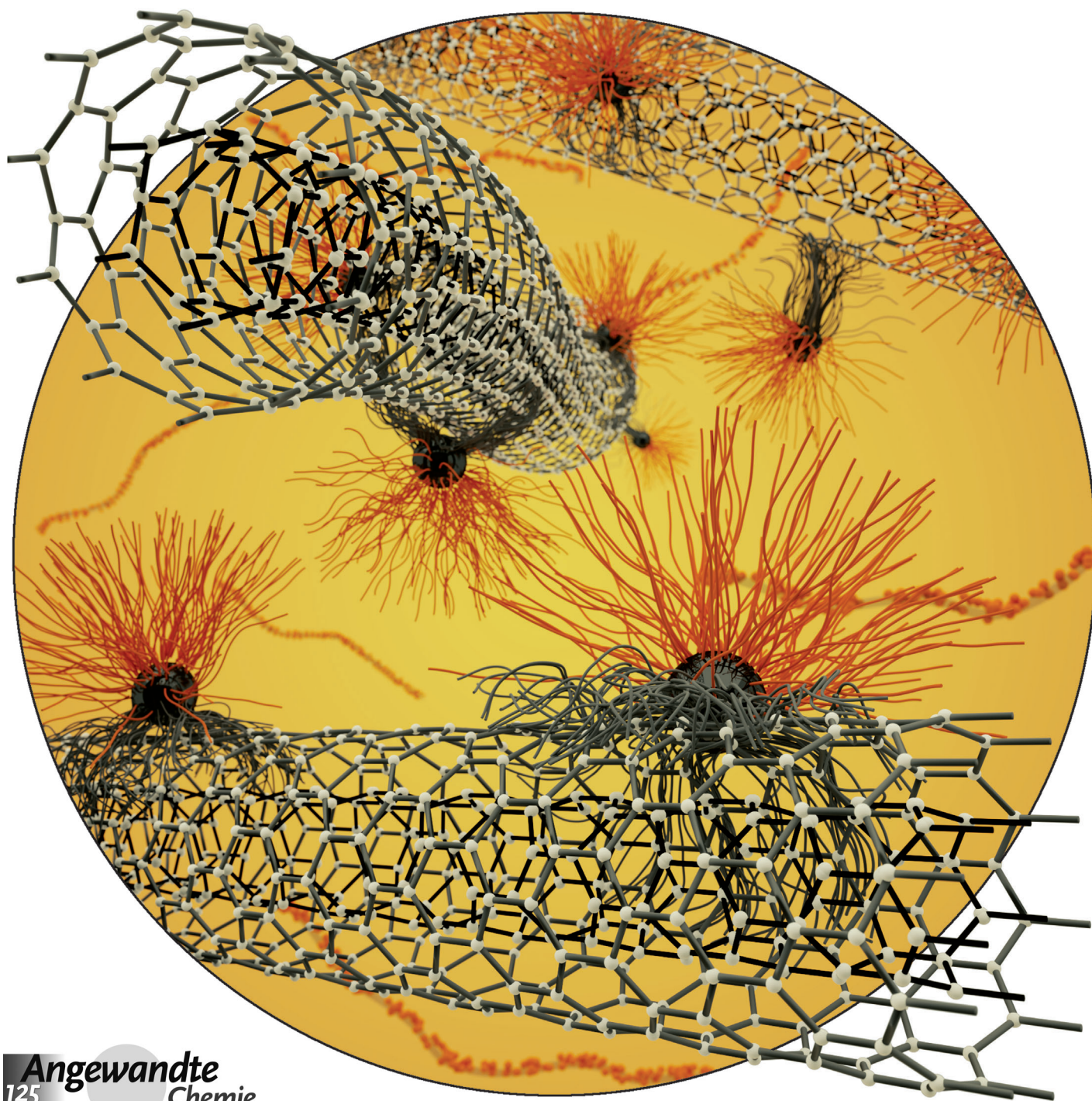


Janus-Micellen als effektive suprakolloidale Dispersionsmittel für Kohlenstoff-Nanoröhren**

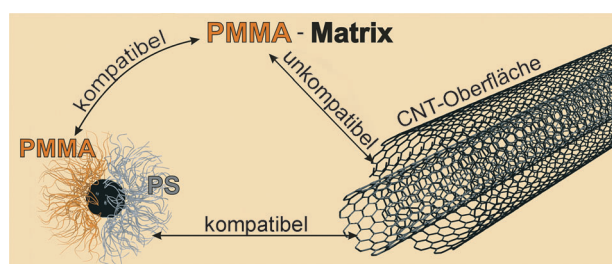
André H. Gröschel, Tina I. Löbling, Petar D. Petrov, Markus Müllner, Christian Kuttner, Florian Wieberger und Axel H. E. Müller**



Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs) sind außergewöhnliche Materialien,^[1,2] die aufgrund ihrer mechanischen Stärke und Robustheit sowie ihrer thermischen und elektrischen Leitfähigkeit attraktive Komponenten für Kompositmaterialien sind.^[3–6] Eine häufige Voraussetzung, um eine gute Verarbeitbarkeit gewährleisten zu können, ist die homogene Verteilung der CNTs im gewählten Medium, z. B. einer Lösung oder einer Polymermatrix. Hohe Kohäsionsenergien (π - π -Wechselwirkung) und geringe Löslichkeitsparameter führen jedoch zu ausgeprägter Bündelbildung der CNTs, was ihre Wechselwirkung mit dem umgebenden Medium minimiert.^[6,7] Um dies zu verhindern, müssen CNTs einzeln mit einer Beschichtung stabilisiert werden, z. B. durch chemische Bindung oder Physisorption an die Oberfläche.^[8–14] Die kovalente Verankerung von Polymeren gewährleistet zwar eine sehr gute Stabilität, unterbricht aber auch das konjugierte π -System der CNTs und kann deren Eigenschaften negativ beeinflussen. Reagentien, die durch Physisorption an CNTs anheften, lösen diese Aufgabe deutlich besser, da sie nicht nur stabilisierend wirken, sondern auch die Eigenschaften der CNTs unbeeinträchtigt lassen. Zu solchen nichtkovalenten Dispersionsmitteln gehören neben reinen organischen Lösungsmitteln auch Tenside,^[15–17] Blockcopolymere^[18–22] und seit kurzem auch Blockcopolymer-Micellen.^[23,24] Organische Lösungsmittel haben den Nachteil, dass die CNTs nicht in ein anderes Medium transferiert werden können, ohne dass es zur Koagulation und Fällung kommt. Tenside und amphiphile Blockcopolymere können zwar an jedes Lösungsmittel angepasst werden, um stabile Dispersionen mit den CNTs zu bilden, jedoch sind oftmals größere Mengen Dispersionsmittel pro CNT notwendig.^[18] Im Vergleich dazu erzielen Blockcopolymer-Micellen ähnlich gute stabilisierende Wir-

kungen, bei jedoch erheblich geringerem Dispersionsmittel/CNT-Verhältnis.^[23] Die Entwicklung geht hin zu maßgeschneiderten Dispergatoren, die sowohl eine hohe Affinität zu den CNTs als auch eine hohe Stabilität in unterschiedlichen Medien aufweisen. Janus-Partikel verschiedener Topologien^[25–29] haben generell eine hohe Grenzflächenaffinität,^[30–32] zeigen eine außergewöhnlich gute Effizienz als „Riesen-Tenside“ in der Emulsionspolymerisation und werden als Verträglichkeitsvermittler in Polymermischungen eingesetzt.^[33,34] Die starke Affinität zu Grenzflächen resultiert dabei aus dem Pickering-Effekt^[35] und den beiden streng phasenseparierten Korona-Hemisphären.

Hier demonstrieren wir, dass Polymer-basierte Janus-Micellen (JMs) die Dispersion mehrwandiger Kohlenstoff-Nanoröhren (MWNTs) in verschiedenen Lösungsmitteln, inklusive Wasser, ermöglichen. Das suprakolloidale Hybridmaterial entsteht durch selektive Adsorption der JMs mittels π - π -Wechselwirkung der einen Hemisphäre mit der MWNT-Oberfläche, während die zweite solvophile Hemisphäre durch sterische Abstoßung gleichzeitig die Stabilität im Medium gewährleistet (Schema 1). Da die MWNTs einzig durch nichtinvasive Physisorption der Partikel stabilisiert werden, bleiben das konjugierte π -System und somit die Eigenschaften der MWNTs erhalten.



Schema 1. Verträglichkeitsvermittlung durch Janus-Micellen zwischen MWNTs und einer Polymermatrix.

Eine kürzlich in unserer Arbeitsgruppe entwickelte Synthesemethode ermöglicht die Herstellung von JMs im größeren Maßstab^[36,37] sowie auch die gezielte Konzeption der Nanopartikel hinsichtlich Gesamtgröße, Funktionalität der Korona und Janus-Balance (*JB*; ein Maß für das Größenverhältnis der beiden Korona-Hemisphären). Diese Charakteristika sind ausschlaggebend für die Effektivität, mit der MWNTs dispergiert werden können, und sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Gesamtgröße der JMs kann von 20 bis 100 nm entsprechend dem Außendurchmesser der MWNTs eingestellt werden, welcher typischerweise im Bereich 10–100 nm liegt. Größere Partikel (> 100 nm) könnten sich an mehrere CNTs heften und damit zur Bündelung und Fällung führen. Eine vergleichbare Größe zwischen Physisorbat und Substrat ist von entscheidendem Vorteil bei der Optimierung von Wechselwirkungen, wie ebenfalls kürzlich anhand eines biomimetischen Kompositmaterials gezeigt wurde, bei dem ein „Janus-artiges“ Protein (Hydrophobin) starke supramolekulare Wechselwirkungen zwischen nanofibrillierter Zellulose und Graphen vermittelte.^[38] Mit unserem Ansatz kann die Funktion der Korona-Hemisphären durch adäquate Wahl

[*] Dipl.-Chem. A. H. Gröschel,^[+] M. Sc. T. I. Löblich, Dr. M. Müllner,^[++] Prof. Dr. A. H. E. Müller^[+++]

Makromolekulare Chemie II, Universität Bayreuth
95440 Bayreuth (Deutschland)
E-Mail: andre.groschel@aalto.fi
axel.mueller@uni-mainz.de

Dr. F. Wieberger
Makromolekulare Chemie I, Universität Bayreuth
95440 Bayreuth (Deutschland)
Dipl.-Chem. C. Kuttner
Physikalische Chemie II, Universität Bayreuth
95440 Bayreuth (Deutschland)

Prof. Dr. P. D. Petrov
Institute of Polymers, Bulgarian Academy of Sciences
Sofia 1113 (Bulgarien)

[+] Aktuelle Adresse: Molecular Materials, Department of Applied Physics, Aalto University (Finnland)

[++] Aktuelle Adresse: Department of Chemical & Biomolecular Engineering, University of Melbourne (Australien)

[+++] Aktuelle Adresse: Institut für Organische Chemie Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (Deutschland)

[**] Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft innerhalb des SFB 840 (TP A1) und Mu896/39-1 gefördert. Wir danken Prof. Fery für seine Unterstützung bei der Analyse der JM-MWNT-Wechselwirkungen.

Hintergrundinformationen zu diesem Beitrag sind im WWW unter <http://dx.doi.org/10.1002/ange.201208293> zu finden.

Tabelle 1: Charakteristika der verwendeten Janus-Micellen

Code	Polymer ^[a]	R_h [nm] ^[b]	d_{kern} [nm] ^[c]	JB_{PS} [%] ^[d]
SBM1	$S_{610}B_{640}M_{290}^{127}$	35 ± 3	31 ± 5	68
SBM2	$S_{340}B_{330}M_{360}^{90}$	25 ± 4	22 ± 4	48
SBM3	$S_{280}B_{330}M_{430}^{90}$	27 ± 3	21 ± 3	39
SBT	$S_{580}B_{120}T_{470}^{134}$	29 ± 2	10 ± 2	55
SBV	$S_{360}B_{380}V_{590}^{120}$	29 ± 7	14 ± 3	38

[a] Tiefgestellte Zahlen geben den zahlenmittleren Polymerisationsgrad, DP_n , an, hochgestellte Zahlen das Molekulargewicht in kg mol^{-1} .

[b] Hydrodynamischer Radius in THF bei $c = 1 \text{ g L}^{-1}$. [c] Mittlerer Durchmesser des Kerns, bestimmt durch Auswertung von 250 Kernen mittels TEM-Bildanalyse.^[41] [d] Janus-Balance, $JB_{PS} = DP_{n,PS} / (DP_{n,PS} + DP_{n,C})$ mit C = PMMA, PtBMA oder P2VP.

des in der JM-Synthese eingesetzten ABC-Triblock-Terpolymer an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Darüber hinaus variieren wir systematisch den Einfluss der bisher selten untersuchten Janus-Balance auf die Qualität und Stabilität der Dispersion, hier im Bereich von dominant stabilisierend bis zu dominant adsorbierend.

Die Herstellung des Hybridmaterials ist unkompliziert und wird am Beispiel der Synthese von Polystyrol-*block*-Polybutadien-*block*-Polymethylmethacrylat (PS-PB-PMMA; SBM)-JMs mit einem vernetzten PB-Kern, einem dominanten PS- und einem kleineren PMMA-Patch ($JB_{PS} = 68\%$) verdeutlicht. Reine, unbehandelte MWNTs und SBM1-JMs wurden im Verhältnis 50:50 (w/w) in Aceton dispergiert, sodass die Konzentration an MWNTs in Lösung 0.05 g L^{-1} beträgt. Aceton ist ein gutes Lösungsmittel für M, ein nahezu Theta-Lösungsmittel für S und ein Fällungsmittel für die MWNT. In diesem Umfeld bilden die stark miteinander wechselwirkenden MWNTs Verschlaufungen aus und setzen sich als Bündel ab, während die solvophoben PS-Patches der JMs zur Clusterbildung führen (Abbildung 1 A). Um sowohl die gebündelten MWNTs als auch die JM-Cluster voneinander zu trennen, wurde die Dispersion mit Ultraschall behandelt. Bei anschließender Reassemblierung adsorbieren die JMs auf der Oberfläche der MWNT, um die energetisch ungünstige Grenzfläche der solvophoben Nanoröhroberfläche mit dem umgebenden Lösungsmittel zu verringern. Die PMMA-Patches der JMs unterdrücken aufgrund sterischer Abstoßung die erneute Verschlaufung der MWNTs und bewirken die Bildung einer stabilen Dispersion. Die JMs bilden eine dichte Packung auf den MWNTs, was anhand der Zahl der sphärischen Partikel auf der Nanoröhroberfläche deutlich zu erkennen ist. Dies kann sowohl mittels Transmissions- und Rasterelektronenmikroskopie (TEM, REM) als auch mit Rasterkraftmikroskopie (AFM, Abbildung 1 B) identifiziert werden. Mit Raman-Spektroskopie wurde die Unversehrtheit der MWNT-Oberfläche nach der suprakoloidalen Anheftung der JMs nachgewiesen, während in IR-Messungen der Beitrag beider Materialien zum Spektrum ersichtlich ist (Hintergrundinformationen, Abbildungen S1–S3).

Überraschenderweise adsorbieren die JMs selektiv auf die Oberfläche der MWNTs anstatt miteinander zu reassemblieren, unabhängig von der Janus-Balance und Konzentration. Bei einem JM/MWNT-Verhältnis von 33:66 (w/w) adsorbieren alle JMs vollständig auf der MWNT-Oberfläche,

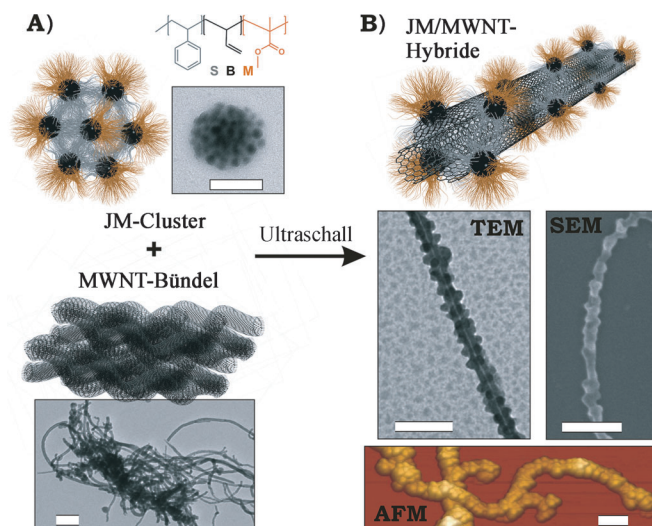


Abbildung 1. Bildung des Hybridmaterials. A) Schematische Darstellung und TEM-Bilder der Ausgangsmaterialien in Aceton. B) Suprakoloidale Reassemblierung nach Behandlung mit Ultraschall. Skalierung: 200 nm.

und es werden keinerlei JMs oder JM-Cluster detektiert (Abbildung 2 A). Eine dichte Packung von JMs auf den MWNTs wird noch nicht beobachtet, da genug Platz zur gleichmäßigen Verteilung zur Verfügung steht. Bei einem Verhältnis von 50:50 (w/w) bildet SBM1 eine dichte Packung aus mehreren Schichten aus, wobei nach wie vor keine verbliebenen JMs im TEM-Hintergrund zu finden sind (Abbildung 2 B). Ein Überschuss an JMs (90:10 w/w) führt zu einer dichten mehrlagigen Packung und sogar zum Wachstum von JM-Clustern von der MWNT-Oberfläche (Abbildung S4).

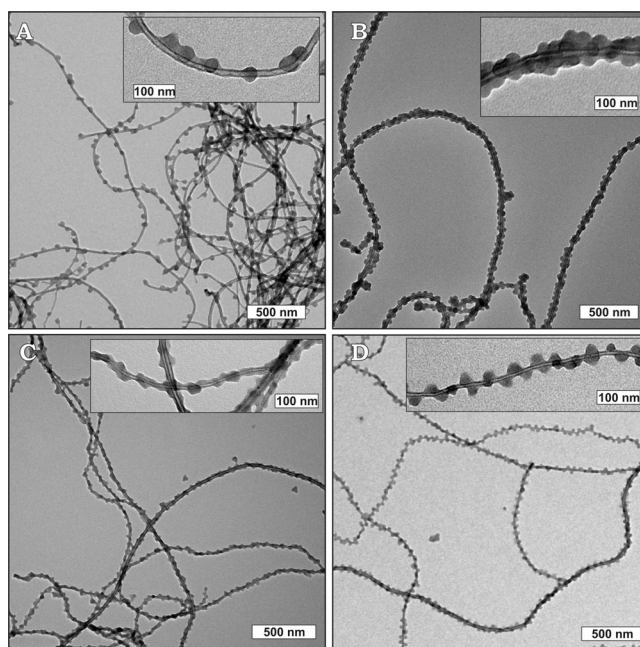


Abbildung 2. Adsorptionsverhalten von SBM1-JM an MWCNTs in Aceton bei A) 80:20 (w/w) und B) 50:50 (w/w) sowie von C) SBM2 und D) SBM3 jeweils bei 50:50 (w/w).

Erst bei einem solch großen Überschuss aggregiert ein Teil der JMs wieder zu den ursprünglichen Clustern. Die starke und selektive Affinität der JMs zur Lösungsmittel/MWNT-Grenzfläche kann erklärt werden durch: 1) den Pickering-Effekt,^[35] 2) die π - π -Wechselwirkung des Polystyrols mit der sp^2 -hybridisierten MWNT-Oberfläche und vor allem 3) die Minimierung ungünstiger Grenzflächenenergien. In einem guten Lösungsmittel wie THF (oder unpolareren Lösungsmitteln) adsorbieren die JMs nicht auf der MWNT-Oberfläche, sondern verteilen sich gleichmäßig auf dem TEM-Netz (Abbildung S5), da die Triebkraft der Oberflächenenergie-minimierung extrem reduziert ist. Durch wiederholtes Wechseln des Lösungsmittels kann reversibel zwischen dem adsorbierten (in Aceton) und desorbierten Zustand (in THF) geschaltet werden, was den den suprakolloidalen Charakter dieser Wechselwirkung weiter unterstreicht.

In aktuellen Arbeiten konnten unsere sowie andere Arbeitsgruppen zeigen, dass die Janus-Balance ein Schlüsselfaktor zum Verständnis des Aggregationsverhaltens in selektiven Lösungsmitteln ist.^[36,39,40] Den fundamentalen Einfluss auf die Menge der adsorbierenden JMs zeigen wir anhand einer Serie von SBM-JMs, angefangen mit einem dominanten adsorbierenden Patch (SBM1, $JB_{PS}=68\%$), über gleich große Hemisphären (SBM2, $JB_{PS}=48\%$) bis hin zu einem dominanten stabilisierenden Patch (SBM3, $JB_{PS}=39\%$). Das Adsorptionsverhalten in Aceton wurde sowohl qualitativ über TEM (Abbildungen 2B–D und S4–S7) als auch quantitativ durch thermogravimetrische Analyse (TGA) (Abbildungen 3 und S8, S9) ermittelt. Solange die Oberfläche der MWNTs nicht abgesättigt ist ($< 50:50$ w/w), adsorbieren alle JMs vollständig, was durch die lineare Kurve in Abbildung 3 und durch die Abwesenheit überschüssiger JMs in den Abbildungen 2B–D bestätigt wird. Bei konstantem JM/MWNT-Verhältnis (66:33 w/w) nimmt die Menge der adsorbierten JMs von SBM1 zu SBM3 ab. SBM1 hat sowohl den größten adsorbierenden PS-Patch als auch die kleinste repulsive PMMA-Korona – beides Faktoren, die eine dichte Packung der Micellen auf der Oberfläche begünstigen. Die

Adsorption des PS-Patches bewirkt einen Kaskadeneffekt, da jeder PS-Patch andere JMs „anzieht“ und jede JM wiederum eine zusätzliche hydrophobe Oberfläche erzeugt. Daher beobachten wir bei hohen JM-Anteil (83:17 w/w) immer noch nahezu quantitative Adsorption in TGA-Messungen (ca. 70 Gew.-%) und Mehrlagen- bzw. Clusterbildung im TEM (Abbildungen S4, S8 und S9). Im Vergleich dazu erreicht SBM2 bereits bei einem Verhältnis von 50:50 (w/w) sein Adsorptionslimit mit ca. 45 Gew.-%, was sich in einer geringeren Packungsdichte als bei SBM1 äußert (Abbildung 2C). Zudem nimmt die größere stabilisierende PMMA-Korona ein entsprechend größeres Volumen ein und blockiert einen Teil der Oberfläche für andere JMs. Diese Effekte sind bei SBM3 noch deutlicher ausgeprägt (Abbildung 2D). Hier wird eine Sättigung der Oberfläche bereits bei 35 Gew.-% erreicht, da die PMMA-Korona aufgrund des Platzanspruches die Aufnahme weiterer JMs blockiert. Im TEM-Bild erscheint der Raum zwischen den einzelnen JMs leer, da PMMA durch den Elektronenstrahl abgebaut wird. Aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung ist der vom PMMA abgedeckte Raum für weitere JMs nicht mehr zugänglich, wodurch eine komplette Bedeckung der Oberfläche verhindert wird. Sowohl im TEM als auch im REM erkennt man, dass sich die JMs auf der MWNT-Oberfläche in einem regelmäßigen Abstand ähnlich einer helikalen Packung anordnen (Abbildung 2D, S7), wobei der Abstand zwischen zwei JMs durch das Ausschlussvolumen der PMMA-Korona definiert wird. Das helikale Umwickeln von CNTs ist ein häufig wiederkehrendes Motiv und wurde bereits für einige Polymere beschrieben.^[11]

Der eindeutige Vorteil der JMs ist ihre Eigenschaft, unterschiedliche chemische Umgebungen innerhalb eines einzelnen Partikels räumlich voneinander getrennt zu vereinen. Wir haben unterschiedliche JMs hergestellt, deren einer Patch die Anforderungen zunehmend polarer Lösungsmittel erfüllt, während in allen Fällen der bewährte PS-Patch erhalten bleibt, welcher seine sehr hohe Affinität zu MWNTs bereits bewiesen hat. Zunächst haben wir den PMMA-Patch (erhöht die Mischbarkeit in einer Matrix aus PMMA oder Poly(styrol-co-acrylnitril)) gegen Poly(*tert*-butylmethacrylat) (PtBMA; T) ausgetauscht, das in Ethanol stabil ist (Abbildung 4A). Nach Abscheidung aus Ethanol sind PS-*b*-PB-*b*-PtBMA (SBT)-JMs auf den MWNTs als gleichmäßig angeordnete schwarze Punkte, umrandet von einer dunkelgrauen Beschichtung, wahrzunehmen (S, selektiv kontrastiert mit RuO_4). PS-*b*-PB-*b*-P2VP(SBV)-JMs enthalten einen pH-sensitiven Poly(2-vinylpyridin)-Patch (P2VP, V) und können MWNTs auch in saurer wässriger Lösung stabilisieren. In Wasser pH 3 kann die Verteilung der SBV-JMs auf der MWNT-Oberfläche deutlich im Kryo-TEM sichtbar gemacht werden, ohne dass die Verteilung der JM auf den MWNTs durch Trocknungseffekte verfälscht werden könnte (Abbildung 4B). P2VP bildet eine funktionelle Korona, die die reversible Fällung und Redispersierung des gesamten suprakolloidalen Hybrids erlaubt (scharfer Übergang bei pH 4) und für ihre überaus stabile Koordination von komplexen Metallanionen bekannt ist (z.B. $AuCl_4^-$, TiO_2^{2-}). JMs mit einer Hemisphäre aus Polymethacrylsäure (MAA) (SBMAA wird durch Hydrolyse von SBM erhalten)^[41] bildet stabile Dispersionen in neutraler und basischer Lösung (Abbil-

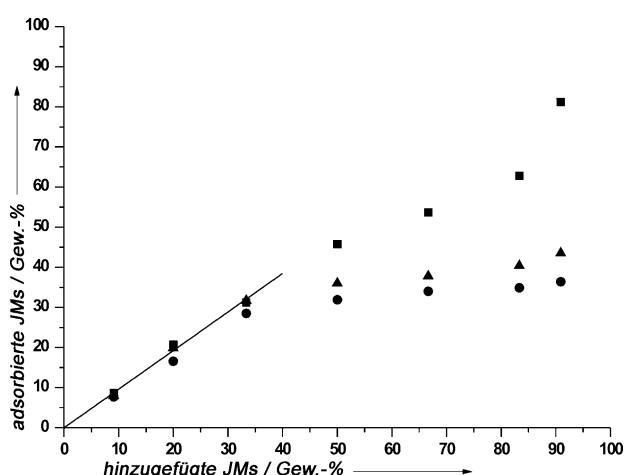


Abbildung 3. Adsorptionseffizienz der Janus-Micellen SBM1–3 in Abhängigkeit von der Janus-Balance, bestimmt durch Thermogravimetrie. ■: SBM1, $JB_{PS}=69\%$, ▲: SBM2, $JB_{PS}=48\%$, ●: SBM3, $JB_{PS}=39\%$, —: linearer Bereich.

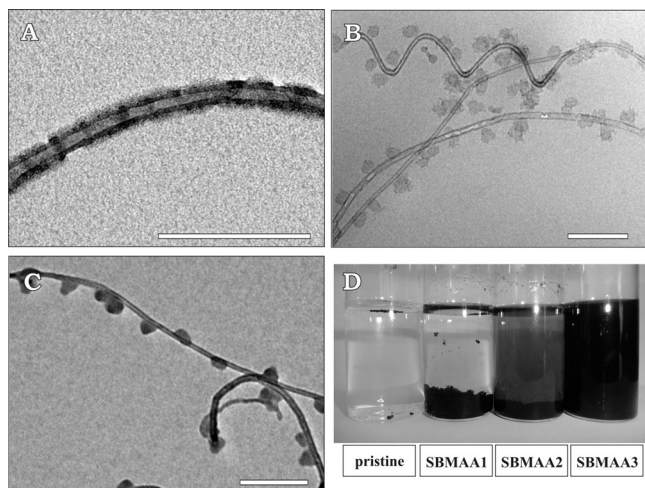


Abbildung 4. JM/MWNT-Hybride (50:50 w/w) in protischen Lösungsmitteln. A) SBT-JMs in Ethanol, B) SBV-JMs in Wasser bei pH 3 (Kryo-TEM) und C) SBMAA3-JMs in Wasser bei pH 10. Skalierung: 200 nm. D) Dispersionen von MWNTs in Wasser bei pH 10: unbehandelt, stabilisiert mit SBMAA1, SBMAA2 und SBMAA3.

dung 4C). Diese Hybride zeigen wiederum eine Fällungs/Redispergierungs-Schwelle bei pH 5 und PMAA ermöglicht die Koordination von Metallkationen (z.B. Ag^+ , Cd^{2+}). Überraschenderweise verhält sich die Stabilität der SBMAA/MWNT-Hybride in Wasser bei pH 10 umgekehrt zur adsorbierten Menge an JMs und steigt von SBMAA1 zu SBMAA3 an (Abbildung 4D). Das Hybridmaterial mit SBMAA1 ($J_{\text{BPS}} = 68\%$) sedimentiert aufgrund des relativ kleinen stabilisierenden Patches. Die Stabilität der Dispersionen nimmt zu für SBMAA2 und erreicht ihr Maximum bei SBMAA3 ($J_{\text{BPS}} = 39\%$), was klar zeigt, dass nicht die Zahl der adsorbierten JMs, sondern der Beitrag jeder JM zur Stabilität des Hybrids ausschlaggebend ist, d.h. eine Janus-Balance zugunsten des stabilisierenden MAA-Patches.

Zusammengefasst eignen sich Janus-Micellen hervorragend als suprakolloidale Dispersionsmittel für Kohlenstoff-Nanoröhren. JMs zeichnen sich durch ihren amphiphilen Charakter und einstellbare Oberflächenpatches aus, ihre suprakolloidale Wechselwirkung mit den CNTs beeinträchtigt die CNT-Eigenschaften nicht, und die Stabilisierung erfolgt bereits bei geringen Mengen an Dispersionsmittel (10:90 w/w). Im getrockneten Zustand „verkleben“ die JMs die CNTs miteinander und bewirken, dass das Hybridmaterial eine Dichte ähnlich dem glasartigen Polymer annimmt ($\rho_{\text{Hybrid}} = 1.15\text{--}1.50\text{ g cm}^{-3}$). Dies erleichtert die Handhabung und macht den Umgang mit CNTs sicherer. Im Vergleich dazu haben reine aufgelockerte CNTs eine sehr geringe Dichte und werden im trockenen Zustand leicht aufgewirbelt. Die quantitative Beschichtung erlaubt zudem das Ausfällen, Trocknen, Aufbewahren und Redispergieren in jedem Medium, das zur stabilisierenden Corona passt. Die Janus-Balance bestimmt die Quantität der adsorbierten JMs und kontrolliert das Adsorptionsverhalten von Schichten bis hin zu einer helikalen Anordnung. Die direkte Visualisierung des Adsorptionsverhaltens sollte beim Entwurf zukünftiger Dispersionsmittel für CNTs behilflich sein. Mehrere andere

Patch-Komponenten werden derzeit in unserer Arbeitsgruppe untersucht, darunter das pH- und Temperatur-sensitive Poly(2-(dimethylaminoethylmethacrylat)), Poly(ϵ -caprolacton) und biokompatibles Polyethylenoxid.

Eingegangen am 15. Oktober 2012,
veränderte Fassung am 19. Dezember 2012
Online veröffentlicht am 20. Februar 2013

Stichwörter: Dispersionsmittel · Janus-Partikel · Kohlenstoff-Nanoröhren · Kolloide · Selbstorganisation

- [1] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. de Heer, *Science* **2002**, 297, 787–792.
- [2] G. Sahoo, S. Rana, J. W. Cho, L. Li, S. H. Chan, *Prog. Polym. Sci.* **2010**, 35, 837–867.
- [3] S. J. Kang, C. Kocabas, T. Ozel, M. Shim, N. Pimparkar, M. A. Alam, S. V. Rotkin, J. A. Rogers, *Nat. Nanotechnol.* **2007**, 2, 230–236.
- [4] Z. Han, A. Fina, *Prog. Polym. Sci.* **2011**, 36, 914–944.
- [5] Z. Spitalsky, D. Tasis, K. Papagelis, C. Galiotis, *Prog. Polym. Sci.* **2010**, 35, 357–401.
- [6] L. Hu, D. S. Hecht, G. Grüner, *Chem. Rev.* **2010**, 110, 5790–5844.
- [7] E. Nativ-Roth, R. Shvartzman-Cohen, C. Bounioux, M. Florent, D. Zhang, I. Szleifer, R. Yerushalmi-Rozen, *Macromolecules* **2007**, 40, 3676–3685.
- [8] N. Roy, R. Sengupta, A. K. Bhowmick, *Prog. Polym. Sci.* **2012**, 37, 781–819.
- [9] T. Akasaka, F. Wudl, S. Nagase, *Chemistry of Nanocarbons*, Wiley, Hoboken, **2010**, S. 1–48.
- [10] D. Tasis, N. Tagmatarchis, A. Bianco, M. Prato, *Chem. Rev.* **2006**, 106, 1105–1136.
- [11] A. Hirsch, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 1933–1939; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 1853–1859.
- [12] D. Tasis, N. Tagmatarchis, V. Georgakilas, M. Prato, *Chem. Eur. J.* **2003**, 9, 4000–4008.
- [13] N. Karousis, N. Tagmatarchis, D. Tasis, *Chem. Rev.* **2010**, 110, 5366–5397.
- [14] J.-M. Thomassin, D. Vuluga, M. Alexandre, C. Jérôme, I. Moltenberg, I. Huynen, C. Detrembleur, *Polymer* **2012**, 53, 169–174.
- [15] M. R. Diehl, S. N. Yaliraki, R. A. Beckman, M. Barahona, J. R. Heath, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 363–366; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 353–356.
- [16] C. A. Furtado, U. J. Kim, H. R. Gutierrez, L. Pan, E. C. Dickey, P. C. Eklund, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126, 6095–6105.
- [17] K. K. Kim, S. M. Yoon, J. Y. Choi, J. Lee, B. K. Kim, J. M. Kim, J. H. Lee, U. Paik, M. H. Park, C. W. Yang, K. H. An, Y. Chung, Y. H. Lee, *Adv. Funct. Mater.* **2007**, 17, 1775–1783.
- [18] V. C. Moore, M. S. Strano, E. H. Haroz, R. H. Hauge, R. E. Smalley, J. Schmidt, Y. Talmon, *Nano Lett.* **2003**, 3, 1379–1382.
- [19] N. Sluzarenko, B. Heurtefeu, M. Maugey, C. Zakri, P. Poulin, S. Lecommandoux, *Carbon* **2006**, 44, 3207–3212.
- [20] J. Zou, L. Liu, H. Chen, S. I. Khondaker, R. D. McCullough, Q. Huo, L. Zhai, *Adv. Mater.* **2008**, 20, 2055–2060.
- [21] V. A. Sinani, M. K. Gheith, A. A. Yaroslavov, A. A. Rakhnyskaya, K. Sun, A. A. Mamedov, J. P. Wicksted, N. A. Kotov, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, 127, 3463–3472.
- [22] S. Soll, M. Antonietti, J. Yuan, *ACS Macro Lett.* **2012**, 1, 84–87.
- [23] H.-I. Shin, B. G. Min, W. Jeong, C. Park, *Macromol. Rapid Commun.* **2005**, 26, 1451–1457.
- [24] P. D. Petrov, G. L. Georgiev, A. H. E. Müller, *Polymer* **2012**, 53, 5502–5506.
- [25] R. Erhardt, A. Böker, H. Zettl, H. Kaya, W. Pyckhout-Hintzen, G. Krausch, V. Abetz, A. H. E. Müller, *Macromolecules* **2001**, 34, 1069–1075.

- [26] A. Walther, M. Drechsler, S. Rosenfeldt, L. Harnau, M. Ballauff, V. Abetz, A. H. E. Müller, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 4720–4728.
- [27] F. Wurm, A. F. M. Kilbinger, *Angew. Chem.* **2009**, *121*, 8564–8574; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 8412–8421.
- [28] D. Hirsemann, S. Shylesh, R. A. De Souza, B. Diar-Bakerly, B. Biersack, D. N. Mueller, M. Martin, R. Schobert, J. Breu, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 1376–1380; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 1348–1352.
- [29] A. Walther, A. H. E. Müller, *Soft Matter* **2008**, *4*, 663–668.
- [30] A. Walther, X. André, M. Drechsler, V. Abetz, A. H. E. Müller, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 6187–6198.
- [31] N. Glaser, D. J. Adams, A. Böker, G. Krausch, *Langmuir* **2006**, *22*, 5227–5229.
- [32] T. M. Ruhland, A. H. Gröschel, A. Walther, A. H. E. Müller, *Langmuir* **2011**, *27*, 9807–9814.
- [33] A. Walther, M. Hoffmann, A. H. E. Müller, *Angew. Chem.* **2008**, *120*, 723–726; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 711–714.
- [34] A. Walther, K. Matussek, A. H. E. Müller, *ACS Nano* **2008**, *2*, 1167–1178.
- [35] B. P. Binks, P. D. I. Fletcher, *Langmuir* **2001**, *17*, 4708–4710.
- [36] A. H. Gröschel, F. H. Schacher, H. Schmalz, O. V. Borisov, E. B. Zhulina, A. Walther, A. H. E. Müller, *Nat. Commun.* **2012**, *3*, 710.
- [37] A. H. Gröschel, A. Walther, T. I. Löbbling, J. Schmelz, A. Harnisch, H. Schmalz, A. H. E. Müller, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 13850–13860.
- [38] P. Laaksonen, A. Walther, J.-M. Malho, M. Kainlahti, O. Ikkala, M. B. Linder, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 8847–8850; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 8688–8691.
- [39] S. Jiang, S. Granick, *J. Chem. Phys.* **2007**, *127*, 161102–161104.
- [40] S. Jiang, S. Granick, *Langmuir* **2008**, *24*, 2438–2445.
- [41] R. Erhardt, M. Zhang, A. Böker, H. Zettl, C. Abetz, P. Frederik, G. Krausch, V. Abetz, A. H. E. Müller, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 3260–3267.



GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER



IUPAC
International Union of
Pure and Applied Chemistry

Reisestipendien für junge Chemiker und Chemikerinnen

IUPAC General Assembly und Congress

Vom 8. bis zum 16. August 2013 trifft sich in Istanbul die IUPAC Community: die General Assembly tagt vom 8. bis zum 15. August und der Congress findet statt vom 11. bis 16. August.

Die Gesellschaft Deutscher Chemiker ermutigt junge Chemiker und Chemikerinnen, an diesem besonderen Ereignis teilzunehmen und bietet **sechs Reisestipendien** in Höhe von jeweils 1.200 Euro an. Drei Stipendien sind für in Deutschland und drei für in den östlichen Nachbarländern tätige Chemiker und Chemikerinnen vorgesehen.

Die Gewinner der Reisestipendien sollen auf jeden Fall am „World Chemical Leadership Meeting“ teilnehmen. Dieses Treffen findet im Rahmen der General Assembly statt und wird Visionen zur Zukunft der Chemie entwickeln und diskutieren.

Die GDCh berücksichtigt Bewerbungen von jungen Chemikern und Chemikerinnen, die zum Zeitpunkt des Kongresses bis zu 35 Jahre alt sind.

Bitte fügen Sie Ihrem Bewerbungsschreiben folgende Unterlagen bei:
Tabellarischer Lebenslauf, Bestätigung über die derzeitige Tätigkeit, Liste Ihrer Publikationen, Empfehlungsschreiben des Dekans oder Betreuers oder einer anderen geeigneten Person.

Einsendeschluß für Ihre Bewerbungen ist der 15. Mai 2013.

Senden Sie Ihre Bewerbung – vorzugsweise per E-Mail – an Barbara Köhler bei der GDCh: b.koehler@gdch.de