

# Supramolekulare Anordnung von Nanopartikeln an Flüssig-flüssig-Grenzflächen\*\*

Wolfgang H. Binder\*

## Stichwörter:

Grenzflächen · Nanopartikel · Polymere ·  
Selbstorganisation · Supramolekulare Chemie

Die supramolekulare Organisation von Nanopartikeln (NPs), darunter Nanokristalle oder andere nanometergroße Objekte wie Viren, ist eine notwendige Voraussetzung für die Anwendung solcher Materialien in der Nano(bio)-technologie.<sup>[1]</sup> Einfache und vor allem schnelle Strategien sind gefragt, um in allgemein anwendbaren Prozessen NPs in Form geordneter Strukturen (Assemble) anzuordnen. Wegen der hohen strukturellen Vielfalt und der äußerst unterschiedlichen (optischen, magnetischen, elektrischen etc.) Eigenschaften<sup>[2]</sup> von NPs ist dies eine nicht unerhebliche Aufgabe. Prozesse dieser Art erfordern eine ausreichende Stabilisierung der NPs an der Grenzfläche, eine Selbstorganisation mit hohem Ordnungsgrad sowie eine Fixierung nach Abschluss des Ordnungsprozesses. Dazu sind eine ausreichende Bewegungsfreiheit während des Ordnungsprozesses und eine einfache Methode zur Stabilisierung der Assemble nötig. Derzeit werden drei Methoden angewendet, um NPs zu geordneten Aggregaten aufzubauen (Abbildung 1):

a) Die Kristallisation von Nanopartikeln<sup>[1a,2a,2b,3]</sup> über Sedimentationsprozesse führt zu einer dreidimensionalen Anordnung unter Bildung so genannter „kolloidaler Kristalle“. Ein Vorteil dieser Methode liegt im

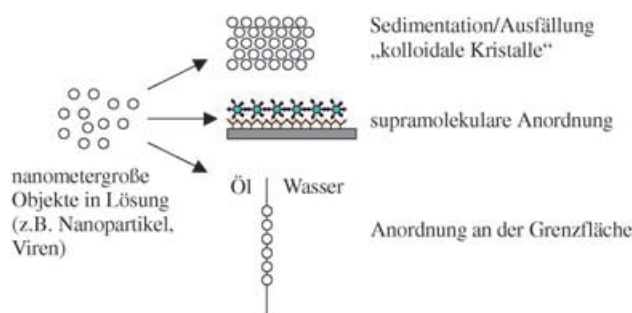


Abbildung 1. Strategien zur Selbstorganisation von Nanopartikeln.

hohen Ordnungsgrad der erhaltenen Materialien, ein entscheidender Nachteil in der Langsamkeit des Sedimentationsprozesses, der oft Tage, wenn nicht Wochen dauern kann.

b) Ein anderer Prozess beruht auf intermolekularen (supramolekularen), gerichteten Wechselwirkungen zwischen einer Oberfläche und NPs (z.B. elektrostatische Kräfte,<sup>[4]</sup> Oligonucleotid-<sup>[5]</sup> oder Metallkomplexbrücken,<sup>[6]</sup> gerichtete Wasserstoffbrücken<sup>[7]</sup> sowie hydrophobe Wechselwirkungen<sup>[8]</sup>). Üblicherweise werden hier die NPs aus Lösungen abgelagert. Ein oftmals entscheidender Nachteil dieser direkten supramolekularen Wechselwirkungen ist die Bildung ungeordneter Assemble, da die von Anfang an sehr starken attraktiven Wechselwirkungen zu einer irreversiblen Anbindung des NP an die Grenzfläche führen und dadurch die Korrektur von Fehlern nach der Anbindung unmöglich wird.

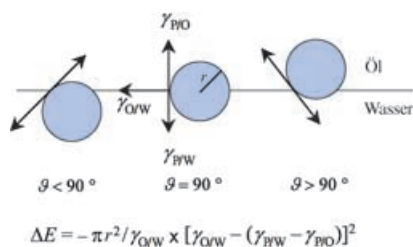
c) Flüssig-flüssig-Grenzflächen bieten eine wichtige und effiziente Alternative<sup>[9]</sup> für die Anordnung von NPs durch Selbstorganisation. So können NPs oder auch kleine Objekte wie

Viren über reine Grenzflächenkräfte angeordnet werden. Entscheidend ist die Präsenz einer Grenzfläche mit hoher Grenzflächenenergie (z.B. einer Öl-Wasser-Grenzfläche), an der diese Prozesse hoch dynamisch und dadurch mit schneller Fehlerkorrektur ablaufen können. In makroskopischen Dimensionen sind Anordnungen dieser Art schon seit ca. 100 Jahren als so genannte „Pickering-Emulsionen“<sup>[10]</sup> bekannt, in denen makroskopisch große Partikel (üblicherweise mit Durchmessern > 1 µm) zur Stabilisierung von Emulsionen verwendet werden. Entscheidend ist dafür die Anordnung dieser Partikel an der Flüssig-flüssig-Grenzfläche.

Die Theorie der Selbstorganisation von NPs an Flüssig-flüssig-Grenzflächen wurde von Binks et al.<sup>[11]</sup> entwickelt (Abbildung 2). Nach dieser Theorie kann die hohe Grenzflächenenergie an einer Öl-Wasser-Grenzfläche durch die Anordnung von NPs an dieser Grenzfläche reduziert werden. Als Folge dieser Energiereduktion entsteht eine Monoschicht von NPs genau an der Grenzfläche. Diesem Ordnungsprozess wirkt

[\*] Prof. Dr. W. H. Binder  
Institut für Angewandte Synthesechemie  
Abteilung Makromolekulare Chemie  
Getreidemarkt 9/163/MC  
1060 Wien (Österreich)  
Fax: (+43) 1-58801-16299  
E-mail: wbinder@mail.zserv.tuwien.ac.at

[\*\*] Der Autor dankt für die Unterstützung durch den FWF, Projekt 14844 CHE.



**Abbildung 2.** Energiebilanz ( $\Delta E$ ) der Anordnung von Partikeln an Grenzflächen. Gemäß Lit. [9a].  $\gamma$ : Grenzflächenspannung, P: Partikel, W: Wasser, O: Öl,  $r$ : effektiver NP-Radius.

die kinetische Energie der noch in den beiden flüssigen Phasen befindlichen NPs entgegen. Die Energiebilanz dieses Prozesses kann folgendermaßen bestimmt werden (Abbildung 2): Die Platzierung eines NP an der Grenzfläche führt zu einer Reduktion der Grenzflächenenergie, die sich aus der Differenz der Öl-Wasser-Grenzflächenspannung ( $\gamma_{OW}$ ), der Partikel-Wasser-Grenzflächenspannung ( $\gamma_{PW}$ ) sowie der Partikel-Öl-Grenzflächenspannung ( $\gamma_{PO}$ ) errechnet ( $r$  entspricht dem effektiven Radius des NP). Demnach können drei Parameter verändert werden, um die Selbstorganisation der NP an der Grenzfläche zu steuern:

- Die Oberflächenstruktur der NPs, die durch chemische Reaktionen einfach modifiziert werden kann und so zu einer Veränderung der Grenzflächenspannung führt (Veränderung von  $\gamma_{PW}$  und  $\gamma_{PO}$ ); dazu können kovalent an die Oberfläche gebundene oder auch rein adsorbierte Liganden verwendet werden. Ein wichtiger Aspekt bei der Modifizierung der Oberfläche ist der Einfluss des Liganden auf die Eigenschaften des NP-Kerns, da dies die Auswahl an möglichen Modifizierungen einschränken kann.
- Die Natur der Öl-Wasser-Grenzfläche (Modifizierung von  $\gamma_{OW}$ ).
- Der effektive Radius  $r$  der Nanopartikel. Der Theorie zufolge sollten kleinere NPs schwächer mit der Grenzfläche wechselwirken als größere NPs.

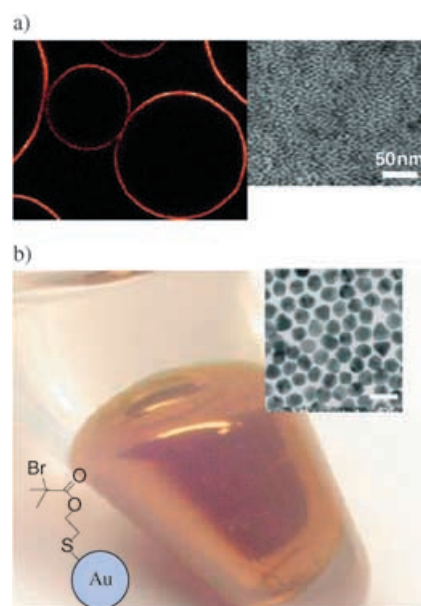
Alle drei Parameter können nun variiert werden, um die Position der NPs an der Grenzfläche exakt einzustellen: Nur wenn der Kontaktwinkel  $\vartheta$  genau bei  $90^\circ$  liegt, wird das Nanopar-

tikel auch genau in der Mitte der Öl-Wasser-Grenzfläche (also in der Mitte zwischen Öl- und Wasserphase) lokalisiert sein; in allen anderen Fällen wird entweder die Öl- oder die Wasserphase bevorzugt sein. Die Energie des Adsorptionsprozesses kann folgendermaßen bestimmt werden: Auf der Basis bekannter Werte<sup>[12b]</sup> ( $\gamma_{OW} = 35.7 \text{ mN m}^{-1}$ ;  $\gamma_{PO} = 15 \text{ mN m}^{-1}$ ;  $\gamma_{PW} = 40 \text{ mN m}^{-1}$ ) ist der Radius der Partikel entscheidend: Ein Partikel mit  $d \approx 1 \mu\text{m}$  ergibt einen Energiebetrag von  $\Delta E \approx 10^7 k_B T$  und führt damit zu einer irreversiblen Adsorption der NPs an der Grenzfläche. Partikel mit kleineren Radien adsorbieren mit wesentlich kleineren Energiebeträgen, da  $\Delta E$  proportional zu  $r^2$  ist ( $d = 100 \text{ nm}$  führt zu  $\Delta E \approx 10^5 k_B T$ ,  $d = 10 \text{ nm}$  zu  $\Delta E \approx 10^3 k_B T$  und  $d = 1 \text{ nm}$  zu  $\Delta E \approx 10^1 k_B T$ ).

Soweit zur Theorie – doch alle Theorie ist eitler Schein ohne Beweis. Vor kurzem hat die Arbeitsgruppe um Russell<sup>[12]</sup> die Selbstorganisation von CdSe-Nanopartikeln mit zwei unterschiedli-

chen Durchmessern (2.7 und 4.6 nm) untersucht, die mit Phosphinoxidliganden stabilisiert waren (Abbildung 3a). Der Adsorptionsprozess kann direkt über die unterschiedliche (größenabhängige) Fluoreszenz  $F$  dieser beiden CdSe-Nanopartikel verfolgt werden: Die anfängliche Fluoreszenz durch die Adsorption der kleineren NPs ( $r = 2.7 \text{ nm}$ ;  $\lambda_F = 525 \text{ nm}$ ) an einer Toluol-Wasser-Grenzfläche wird durch die Fluoreszenz bei 610 nm der nachher zugegebenen, größeren Nanopartikel abgelöst. Dies beweist nicht nur die Theorie, nach der kleinere Partikel durch größere verdrängt werden können, sondern ermöglicht auch die Bestimmung der Zeitkonstanten des Adsorptionsprozesses. Die Partikel zeigen hohe Mobilität an der Grenzfläche (befinden sich also in einem quasi-fluiden Zustand), ohne hoch geordnete Strukturen zu bilden. Nach der Entfernung des Lösungsmittels durch einfaches Abdampfen werden stabile, aus Nanopartikeln bestehende Filme erhalten. Ein ähnlicher Ordnungsprozess kann auch über geladene Gold-Nanopartikel<sup>[9c]</sup> oder spannungsinduzierte Prozesse<sup>[13]</sup> ausgelöst werden. Ein eng verwandtes Konzept von Möhwald et al. nutzt Gold-, Silber- und  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Nanopartikel, deren Oberfläche mit 2-Brom-2-methylpropionat-Liganden modifiziert ist (Abbildung 3b).<sup>[9a]</sup> Der Kontaktwinkel dieser Nanopartikel liegt genau bei  $90^\circ$ , was ihre exakte Anordnung an der Toluol-Wasser-Grenzfläche zur Folge hat. Die Bildung dünner Filme aus einer NP-Monolage mit metallisch-goldener Reflexion und Transmission im blauen Spektralbereich, die über eine Langmuir-Blodgett-Technik auf feste Substrate übertragen werden können, beweist die Bildung dicht gepackter Lagen. An der Grenzfläche können auch „Nanolegierungen“ aus Mischungen von Ag- und Au-Nanopartikeln gebildet werden; damit ist die gezielte Herstellung von Mischungen unterschiedlicher Nanopartikel möglich, solange deren Größe und Packung die Bildung geeigneter Gitter erlaubt.

Die Methode ist allerdings nicht nur auf den Aufbau von Metall-, Halbleiter- oder Silicat-NPs beschränkt<sup>[14]</sup> – auch biologische Objekte können durch Grenzflächenkräfte in Form dünner Membranen angeordnet werden. In ei-



**Abbildung 3.** a) Links: Aufnahme von CdSe-Nanopartikeln an der Grenzfläche eines Wassertropfens in Toluol mit konfokaler Fluoreszenzmikroskopie. Rechts: Transmissionselektronenmikroskop (TEM)-Bild des getrockneten Filmes. Aus Lit. [12a]. b) Photographie von selbstorganisierten Gold-Nanopartikeln (12 nm Durchmesser, Oberfläche mit 2,2'-Dithiobis[1-(2-brom-2-methylpropionyloxy)ethan] belegt] an einer Toluol-Wasser-Grenzfläche. Der Einschub zeigt eine TEM-Aufnahme des resultierenden Filmes (Maßbalken = 25 nm). Aus Lit. [9a].

nem aktuellen Beispiel wurden virale Partikel (mit  $r=33$  nm) an einer Perfluorodecalin-Wasser-Grenzfläche angeordnet.<sup>[15]</sup> Dieses Virus (Kuhersbensen-Mosaikvirus, CPMV) ist ein exzellentes Modellsystem, einerseits wegen seiner hohen Stabilität in organischen Lösungsmitteln, andererseits wegen seiner Isolierbarkeit in großen Mengen aus infizierten Pflanzen der Schwarzaugenbohne. Die Detektion der viralen Partikel an der Grenzfläche erfolgte spektroskopisch durch Markierung mit einem Fluoreszenzfarbstoff (Rhodamin). Zusätzlich waren funktionelle Gruppen an der Virusoberfläche angebracht, um ein nachfolgendes Vernetzen der CPMV-Partikel zu ermöglichen. Dazu wurden entweder kovalent vernetzende Gruppen (Glutaraldehyd) oder Biotin-Einheiten, die über Streptavidin nicht-kovalent vernetzt werden können (Abbildung 4), verwendet. Die nichtkovalente Vernetzung erwies sich als der kovalenten überlegen: Sie ergab stabile, ultradünne Membranen aus viralen Partikeln. Dies belegt die Gültigkeit des von Whitesides vorgeschlagenen Konzeptes,<sup>[16]</sup> dass ein selbstorganisierendes System ein ausreichendes Maß an Freiheit und Reversibilität benötigt, um ausgehend von kleinen Bausteinen hoch geordnete anstelle ungeordneter (d.h. glasartiger) Assemblate zu bilden. Die Flüssig-flüssig-Grenzfläche bietet ein ausreichend flexibles System, um Fehler noch während der Selbstorganisation der Nanopartikel zu korrigieren, und führt so in einem schnellen Prozess zu Assemblaten mit einem hohen Ordnungsgrad.

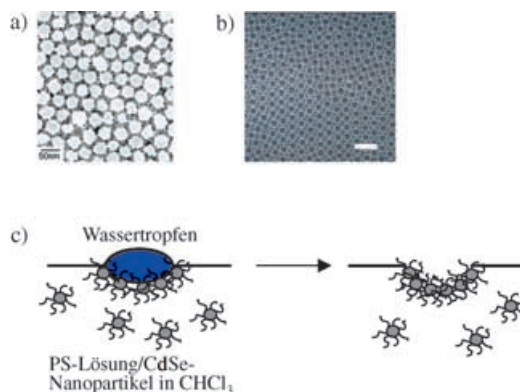
Diese Methode lässt sich auch auf andere Arten von Grenzflächen anwen-

den: So können polymere Grenzflächen<sup>[17]</sup> aus nicht mischbaren Blockcopolymeren wegen ihrer vergleichbaren Grenzflächenenergie (wie bei der Bildung von Micellen in nichtwässrigen Systemen) ähnliche Prozesse bei der Anordnung von Nanopartikeln vermitteln. Zum Beispiel können 5.4 nm große Gold-Nanopartikel innerhalb einer Micelle aus Polystyrol-*block*-poly(4-vinylpyridin) (PS-PVP) in Toluol (in dem nur der PS-Block löslich ist) eingelagert werden (Abbildung 5a). Nachfolgendes Aufbringen auf eine Oberfläche über Schleuderbeschichtung (spin coating) führt zu einem ultradünnen Film, in dem die Gold-Nanopartikel an der Grenzfläche zwischen Micellkern und -hülle in Form eines hexagonalen Mus-

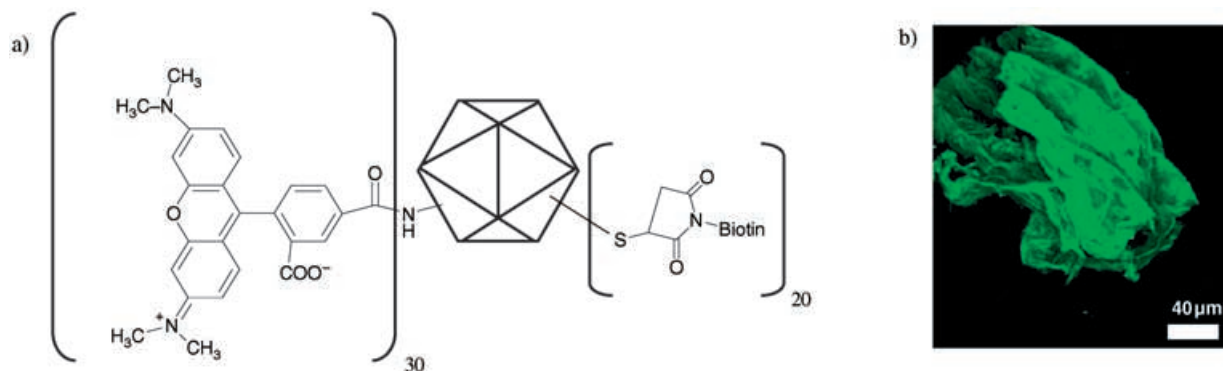
ters konzentriert sind (mit ca. 40 nm Durchmesser pro Sechseck).<sup>[18]</sup> Eine Erweiterung dieses Konzeptes ist die Bildung von Polystyrol mit einem „Bienenwabenmuster“,<sup>[19]</sup> wenn Chloroform, das sowohl Polystyrol als auch CdSe-Nanopartikel enthält, unter feuchten Bedingungen verdampft wird (Abbildung 5b,c).<sup>[20]</sup> Während der Verdampfung ordnen sich die CdSe-Nanopartikel an der Grenzfläche zwischen Chloroform und Wassertropfen an, wonach das mikrometergroße Muster mit an den Wänden adsorbierten Nanopartikeln zurückbleibt.

Die Grenzfläche kann auch als Medium für chemische Reaktionen bei der Synthese von heterodimeren Nanopartikeln<sup>[21]</sup> verwendet werden: So können  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Nanopartikel (8 nm Durchmesser) an der Grenzfläche zwischen einem Dichlormethan-Tropfen und Wasser angeordnet werden (Abbildung 6). Wegen der hohen Dichte und Stabilität des Assemblates können diese Partikel als Keime für die Bildung von Silber-Nanopartikeln fungieren (5.5 nm Durchmesser), die sich an der Außenseite der  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Nanopartikel anlagern. Dies führt zu heterodimeren Nanopartikeln, die aus zwei unterschiedlichen Materialien bestehen.

Grenzflächen sind allgegenwärtig und bieten sich daher als ideale Basis für die Selbstorganisation von Nanopartikeln an; die Einfachheit dieser Prozesse lässt eine Anwendung auf breiter Ebene,

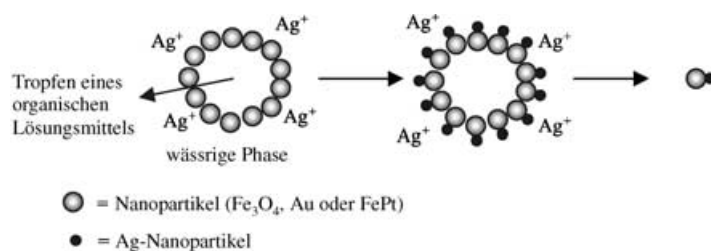


**Abbildung 5.** a) Anordnung von Gold-Nanopartikeln an einer polymen Grenzfläche aus Blockcopolymer-Micellen. Aus Lit. [18a]. b) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von CdSe-Nanopartikeln (4 nm), die durch „solvent casting“ aus einem Polystyrol-Film von einer Chloroform-Wasser-Grenzfläche unter feuchten Bedingungen erhalten wurde. Der Maßbalken entspricht 16  $\mu\text{m}$ . Aus Lit. [20]. c) Mechanismus der Musterbildung bei gleichzeitiger Partikel-Anordnung an der Chloroform-Wasser-Grenzflächen. Aus Lit. [20].



**Abbildung 4.** a) CPMV-Partikel, die mit Rhodamin und Biotin modifiziert sind. b) Mikroskopische Aufnahme der nach Selbstorganisation und Vernetzung der CPMV-Partikel entstehenden Membran. Aus Lit. [15a].





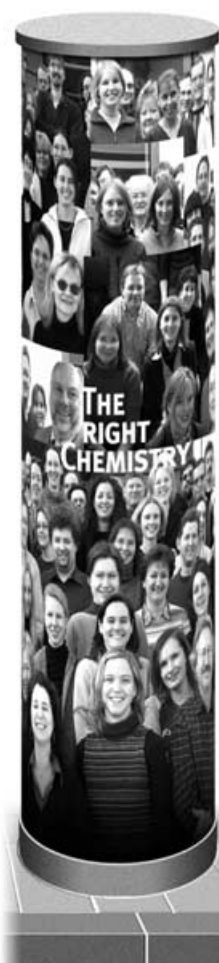
**Abbildung 6.** Bildung von heterodimeren Nanopartikeln durch Anordnung von  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Nanopartikeln an einer Flüssig-flüssig-Grenzfläche und nachfolgende Keimwirkung unter Bildung von Silber-Nanopartikeln an der Außenseite der  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Nanopartikel. Gemäß Lit. [21].

auch in der Industrie erwarten. Besonders in den Bereichen ultradünner Membranen, der Positionierung nanometergroßer Objekte auf Oberflächen, Größenselektion von Nanopartikeln und Bildung von Kompositmaterialien hat diese Methode ein großes Potenzial für zukünftige Anwendungen.

Online veröffentlicht am 20. Juli 2005

- [1] a) E. Katz, I. Willner, *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 6166–6235; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 6048–6108; b) *Nanobiotechnology* (Hrsg.: C. M. Niemeyer, C. A. Mirkin), Wiley-VCH, **2004**; c) *Nanoparticles* (Hrsg.: G. Schmid), Wiley-VCH, **2004**; d) E. Katz, A. N. Shipway, I. Willner in *Nanoscale Materials* (Hrsg.: L. M. Liz-Marzan, V. P. Kamat), Kluwer, Norwell, **2003**, 317–343; e) C. Niemeyer, *Angew. Chem.* **2001**, *113*, 4254–4287; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 4128–4158.
- [2] a) C. P. Collier, T. Vossmeier, J. R. Heath, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **1998**, *49*, 371–404; b) C. B. Murray, C. R. Kagan, M. G. Bawendi, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **2000**, *30*, 545–610; c) P. Alivisatos, *Science* **1996**, *271*, 933–937; d) E. Granot, P. Fernando, I. Willner, *J. Phys. Chem. B* **2004**, *108*, 5875–5881; e) B. B. Yellen, G. Friedman, *Adv. Mater.* **2004**, *16*, 111–115; f) H. Weller, *Angew. Chem.* **1998**, *110*, 1748–1750; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *12*, 1658–1659.
- [3] Repräsentative Übersichtsartikel: a) A. L. Rogach, D. V. Talapin, E. V. Shevchenko, A. Kornowski, M. Haase, H. Weller, *Adv. Funct. Mater.* **2002**, *12*, 653–664; b) E. V. Shevchenko, D. V. Talapin, A. L. Rogach, A. Kronowski, M. Haase, H. Weller, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 11480–11485; c) E. Shevchenko, D. Talapin, A. Kronowski, F. Wiekhorst, J. Kötzler, M. Haase, A. Rogach, H. Weller, *Adv. Mater.* **2002**, *14*, 287–290; ein Beispiel für konvektive Selbstorganisation: d) S. Vengallatore, Y. Peles, L. R. Arana, S. M. Spearing, *Sens. Actuators A* **2004**, *113*, 124–131.
- [4] Zwei repräsentative Übersichtsartikel: a) M.-C. Daniel, D. Astruc, *Chem. Rev.* **2004**, *104*, 293–346; b) S. Maenosono, T. Okubo, Y. Yamaguchi, *J. Nanopart. Res.* **2003**, *5*, 5–15; siehe auch c) M. Mizuno, Y. Sasaki, A. C. C. Yu, M. Inoue, *Langmuir* **2004**, *20*, 11305–11307; d) A. Gole, C. J. Orendorff, C. J. Murphy, *Langmuir* **2004**, *20*, 7117–7122; e) Z. Zhong, S. Patskovsky, P. Bouvrette, J. H. T. Luong, A. Gedanken, *J. Phys. Chem. B* **2004**, *108*, 4046–4052; f) X.-M. Li, V. Paraschiv, J. Huskens, D. N. Reinhoudt, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 4279–4284; g) K. Lee, F. Pang, G. T. Carroll, N. J. Turro, J. T. Koberstein, *Langmuir* **2004**, *20*, 1812–1818; h) H. Tanaka, M. Mituishi, T. Miyashita, *Langmuir* **2003**, *19*, 3103–3105; i) S. Maenosono, T. Okubo, Y. Yamaguchi, *J. Nanopart. Res.* **2003**, *5*, 5–15; j) L. Sheeney-Hai-Ichida, B. Basnar, I. Willner, *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 80–85; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 78–83; k) A. N. Shipway, M. Lahav, R. Gabai, I. Willner, *Langmuir* **2000**, *16*, 8789–8795; l) J. B. Carroll, B. L. Frankamp, S. Srivastava, V. M. Rotello, *J. Mater. Chem.* **2004**, *14*, 690–694; m) ein Beispiel für die Anbindung von Nanopartikeln an polymere Oberflächen: I. Tokareva, S. Minko, J. H. Fendler, E. Hutter, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 15950–15951; n) M. Carrara, J. J. Kakkassery, J.-P. Abid, D. J. Fermin, *ChemPhysChem* **2004**, *5*, 571–575; o) R. Bhat, J. Genzer, B. N. Chaney, H. W. Sugg, A. Liebmman-Vinson, *Nanotechnology* **2003**, *14*, 1145–1152.
- [5] a) M. Andersson, K. Elihn, K. Fromel, K. D. Caldwell, *Coll. Surf. B: Biointerfaces* **2004**, *34*, 165–171; b) L. M. Demer, D. S. Ginger, S.-J. Park, Z. Li, S.-W. Chung, C. A. Mirkin, *Science* **2002**, *296*, 1836–1838; c) Y. Cao, R. Jin, C. A. Mirkin, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 7961–7962; d) S. Park, A. A. Lazarides, C. A. Mirkin, P. W. Brazis, C. R. Kanne-wurf, R. L. Letsinger, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 4003–4006; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 3845–3848; e) N. L. Rosi, C. S. Thaxton, C. A. Mirkin, *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 5616–5619; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 5500–5503; f) J. J. Storhoff, C. A. Mirkin, *Chem. Rev.* **1999**, *99*, 1849–1862, zit. Lit.; g) L. M. Demers, C. A. Mirkin, *Angew. Chem.* **2001**, *113*, 3159–3161; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 3069.
- [6] A. Mulder, J. Huskens, D. N. Reinhoudt, *Org. Biomol. Chem.* **2004**, *2*, 3409–3424, zit. Lit.
- [7] a) A. K. Boal, F. Ilhan, J. E. DeRouchey, T. Thurn-Albrecht, V. M. Rotello, *Nature* **2000**, *404*, 476–478; b) A. K. Boal, V. M. Rotello, *Langmuir* **2000**, *16*, 9527–9532; c) R. Zirbs, F. Kienberger, P. Hinterdorfer, W. H. Binder, *Langmuir* **2005**, im Druck.
- [8] a) V. Mahalingam, S. Onclin, M. Peter, B. J. Ravoo, J. Huskens, D. B. Reinhoudt, *Langmuir* **2004**, *20*, 11756–11762; b) A. Mulder, S. Onclin, M. Peter, J. P. Hoogenboom, H. Beijleveld, J. ter Maar, M. F. Garcia-Parajo, B. Ravoo, J. Huskens, N. F. van Hulst, D. N. Reinhoudt, *Small* **2005**, *1*, 242–253; c) A. Sanyal, T. B. Norsten, O. Uzun, V. M. Rotello, *Langmuir* **2004**, *20*, 5958–5964.
- [9] a) H. Duan, D. Wang, D. G. Kurth, H. Möhwald, *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 5757–5760; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 5639–5642; b) Y. Lin, H. Skaff, T. Emrick, A. D. Dinsmore, T. P. Russell, *Science* **2003**, *299*, 226–229; c) F. Reincke, S. G. Hickey, W. K. Kegel, D. Vanmaekelbergh, *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 464–468; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 458–462.
- [10] a) R. Aveyard, B. P. Binks, J. H. Clint, *Adv. Coll. Interfac. Sci.* **2003**, *100–102*, 503–546; b) eine theoretische Beschreibung: P. P. Kralchevski, I. B. Ivanov, K. P. Ananthapadmanabhan, A. Lips, *Langmuir* **2005**, *21*, 50–63.
- [11] a) B. Binks, J. H. Clint, *Langmuir* **2002**, *18*, 1270–1273, zit. Lit.; b) B. P. Binks, S. O. Lumsdon, *Langmuir* **2000**, *16*, 8622–8631.
- [12] a) Y. Lin, A. Böker, H. Skaff, D. Cookson, A. D. Dinsmore, T. Emrick, T. P. Russell, *Langmuir* **2005**, *21*, 191–194; b) Y. Lin, H. Skaff, T. Emrick, A. D. Dinsmore, T. P. Russell, *Science* **2003**, *299*, 226–229.
- [13] B. Su, J.-P. Abid, D. J. Fermin, H. H. Girault, H. Hoffmannova, P. Krttil, Z. Samec, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 915–919.
- [14] a) J.-W. Hu, G.-B. Han, S.-G. Sun, Z.-Q. Tian, *Langmuir* **2004**, *20*, 8831–8838; b) S. Chen, H. Yao, K. Kimura, *Langmuir* **2001**, *17*, 733–739; c) J. K. Sakata, A. Dwoskin, J. L. Vigorita, E. M. Spain, *J. Phys. Chem. B* **2005**, *109*, 138–141; d) U. K. Gautam, M. Gosh, C. N. R. Rao, *Langmuir* **2004**, *20*, 10775–

- 10778; e) H. Schwartz, Y. Harel, S. Efrima, *Langmuir* **2001**, *17*, 3884–3892; f) D. Rautaray, R. Kavathekar, M. Sastry, *Faraday Discuss.* **2005**, *129*, 205–217; g) M. Platt, R. A. W. Dryfe, E. P. L. Roberts, *Electrochim. Acta* **2004**, *49*, 3937–3945.
- [15] a) J. T. Russell, Y. Lin, A. Böker, L. Su, P. Carl, H. Zettl, J. He, K. Still, R. Tangirala, T. Emrick, K. Littrell, P. Thiagarajan, D. Cookson, A. Frey, Q. Wang, T. P. Russell, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 2420–2426; b) Y. Lin, H. Skaff, A. Böker, A. D. Dinsmore, T. Emrick, T. P. Russell, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 12690–12691.
- [16] G. M. Whitesides, M. Boncheva, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2002**, *99*, 4769–4774.
- [17] Für eine aktuelle Übersicht: a) I. W. Hamley, *Nanotechnology* **2003**, *14*, R39–R54; b) R. Glass, M. Möller, J. Spatz, *Nanotechnology* **2003**, *14*, 1153–1160; c) S.-W. Yeh, Y.-T. Chang, C.-H. Chou, K.-H. Wie, *Macromol. Rapid Commun.* **2004**, *25*, 1679–1686, zit. Lit.
- [18] a) B.-H. Sohn, J.-M. Choi, S. I. Yoo, S.-H. Yun, W.-C. Zin, J. C. Jung, M. Kanehara, T. Hirata, T. Teranishi, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 6368–6369; b) J. J. Chiu, B. J. Kim, E. J. Kramer, D. J. Pine, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 5036–5037.
- [19] G. Widawski, M. Rawiso, B. Francois, *Nature* **1994**, *369*, 387–389.
- [20] A. Böker, Y. Lin, K. Chiapperin, R. Horowitz, M. Thompson, V. Careon, T. Xu, C. Abetz, H. Skaff, A. D. Dinsmore, T. Emrick, T. P. Russell, *Nature Materials* **2004**, *3*, 302–306.
- [21] H. Gu, Z. Yang, J. Gao, C. K. Chang, B. Xu, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 34–35.



WILEY-VCH, a subsidiary of the distinguished publishers John Wiley & Sons Inc. New Jersey, is an international science publisher based in Germany with 75 years experience of producing high-quality professional magazines, scientific journals, books and electronic media in Chemistry, Physics and Life Sciences.

Interested in a career in scientific publishing? ... we are offering four positions of a

## One-Year Editorial Internship (f/m)

We offer extensive training in scientific publishing in an attractive working environment. The candidate(s) will gain on-the-job experience in many different aspects associated with the production of high-quality science journals and books, such as managing the scientific peer-review system of articles, editing and preparing manuscripts for production, writing scientific news, development of journal content, coordination of freelance work as well as compiling marketing materials.

The training period is 12 months, after which adoption into a permanent position may be possible. You will receive focused, on-the-job editorial training from experienced staff and will also be made familiar with the related areas of publishing, including production, marketing and finance. Your role will be working in a team with editors where you will enjoy day to day challenges and responsibilities.

Applicants should be self-motivated, innovative, and have the desire to contribute to the further development of a range of our product line. For our different editorial departments we are looking for candidates with an academic background in the areas of chemistry (preferably organic, polymeric, materials chemistry), life sciences (preferably biochemistry and biotechnology) or physics. As the work involves close ties to authors and scientific editors from all over the world, applicants should have an excellent command of the English language (native speakers preferred). Furthermore organizational skills, diplomacy, and flexibility are needed. Accuracy and a keen eye for detail are also essential as well as the ability to work under pressure and to handle high workloads whilst maintaining best standards.

Previous publishing experience is not required but you should have good interpersonal and communication skills, good scientific judgement, and a strong commitment to the communication of science.

The position is based in our headquarters in Weinheim, Germany. We offer competitive financial and career rewards, training and career development.

Interested? Then please submit a CV, together with a short cover letter describing career goals and explaining your interest in the post to

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA  
Christiane Rabe, Human Resources  
Boschstrasse 12.  
69469 Weinheim, Germany  
or email [CRabe@wiley-vch.de](mailto:CRabe@wiley-vch.de)

 **WILEY-VCH**

The place to be

<http://www.wiley-vch.de>