

Petra Uhlmann, Nikolay Houbenov, Leonid Ionov,
Michail Motornov, Sergiy Minko und Manfred Stamm

Oberflächen passen sich an – bürstenartige Polymermoleküle an Oberflächen mit schaltbaren Eigenschaften

1 Einleitung

Die Herstellung dünner Polymerschichten auf Festkörperoberflächen ist ein effektives Mittel, um für viele Anwendungen relevante Oberflächeneigenschaften, wie Benetzbarkeit, Adhäsion, Lubrikation (Selbstschmierung), Reibung, Biokompatibilität oder die Stabilität von Kolloiden (Systeme von Partikeln im Größenbereich zwischen 1 und 1 000 nm), gezielt einzustellen. Die Faktoren, die Herstellung und Eigenschaften dieser Schichten beeinflussen, waren in den letzten Jahren Gegenstand einer Vielzahl von theoretischen und experimentellen Untersuchungen. Generell ist das Verhalten dieser nanometerdünnen Polymerschichten stark davon abhängig, wie eng die Polymerketten auf eine Fläche gepfropft, d. h. an ein Substrat gebunden werden (Pfropfdichte bzw. „Packungsdichte“). Pfropft man die Polymerketten in einem bestimmten Mindestabstand auf eine Oberfläche, bilden sie sich – wie die Haare einer Bürste – mehr oder weniger senkrecht zu dieser Fläche aus. Heterogene binäre Polymer-Bürsten, die erst in jüngster Zeit experimentell erforscht werden, entstehen, wenn zwei unterschiedliche Polymere, die im Allgemeinen unverträglich miteinander sind, nacheinander auf die Oberfläche gepfropft werden. Die chemische, kovalente Anbindung an das Substrat verhindert eine makroskopische Entmischung des Polymerfilms. Diese Filme erwiesen sich bei der Oberflächenmodifizierung von Substraten als sehr vielseitiges Mittel, mit dem je nach Pfropfdichte stabile (makroskopisch) homogene Oberflächen mit nur einer Eigenschaft oder

schaltbare (responsive) funktionale Oberflächen erzeugt werden können.

2 Erzeugung dünner Schichten aus binären Polymerbürsten

Es gibt verschiedene Verfahren, um nanoskopisch dünne Schichten gepfropfter Polymere auf Festkörperoberflächen herzustellen (siehe Übersichtsartikel [1, 2]). Bei der Grafting-from-Methode wird eine meistens radikalische Polymerisation an der Festkörpergrenzfläche durchgeführt. Dazu werden vorher Reaktionsinitiatoren auf die Oberfläche gepfropft, sodass die entstehenden Polymerbürsten von der Grenzfläche hinweg wachsen (Bilder 1 a – c). Die Methode hat den Vorteil, dass hohe Pfropfdichten erreicht, d. h. viele Polymere dicht aneinander auf dem Substrat verankert werden. Der Nachteil ist allerdings, dass die molekularen Eigenschaften der entstehenden Bürsten durch die hohe Polydispersität (breite Verteilung des Molekulargewichts) der radikalischen Polymerisation und Kettentransfer-Reaktionen als unerwünschte Nebenreaktionen nicht homogen sind. Lebendpfropfungstechniken können hier Abhilfe schaffen, stellen aber durch ihre Komplexität hohe Anforderungen an die Reaktionsführung und verkomplizieren somit die Methode.

Eine zweite Möglichkeit, Polymerbürsten herzustellen, ist die Grafting-to-Methode. Dabei reagieren endgruppenterminierte Polymere (lineare Polymere mit funktionellen Gruppen an einem Kettenende) mit den adäquaten Gruppen einer Haftvermittler-

Oberflächen bestimmen in vielen Fällen das Erscheinungsbild und wichtige Gebrauchseigenschaften von Materialien. Bereits wenige Nanometer dünne Polymerfilme können diese Eigenschaften signifikant verändern und erlauben es, diese Eigenschaften sogar zu schalten, sodass ein Film beispielsweise Wasser abweisen oder aufnehmen kann. Hierzu werden Polymerbürsten aus zwei sehr verschiedenen Polymeren mit dem einen Ende fest an ein Substrat gebunden. In Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen können sie sich dann wechselseitig an der Oberfläche anreichern, sodass die Oberflächeneigenschaften jeweils durch das eine oder andere Polymer bestimmt werden. Dieser rein physikalische Schaltprozess kann durch externe Stimuli (selektive oder nichtselektive Lösungsmittel, pH-Wert, Temperatur etc.) initiiert werden, wobei die physiko-chemischen Oberflächeneigenschaften (Benetzbarkeit, Funktionalität etc.) zwischen den durch die Eigenschaften der verwendeten Polymere bestimmten Extremwerten hin und her schalten können.

It is the surface which in many cases determines the appearance and application-relevant properties of a material. Thin films of polymer brushes just a few nanometres in thickness can change the surface properties significantly and may provide even switching capabilities, where the thin film will for instance take up or repel water. Polymer brushes of two largely different polymer materials must in this case be tightly attached at one end to a solid substrate and will then occupy alternatively the upper or lower surface layer, depending on external conditions. In this way, either one or the other polymer material will be exposed and influence the surface properties. This purely physical switching process can be controlled by external triggers (selective or non-selective solvents, pH value, temperature, etc.). The physico-chemical surface properties (wettability, functionality etc.) switch between values established by the properties of the polymer materials involved.

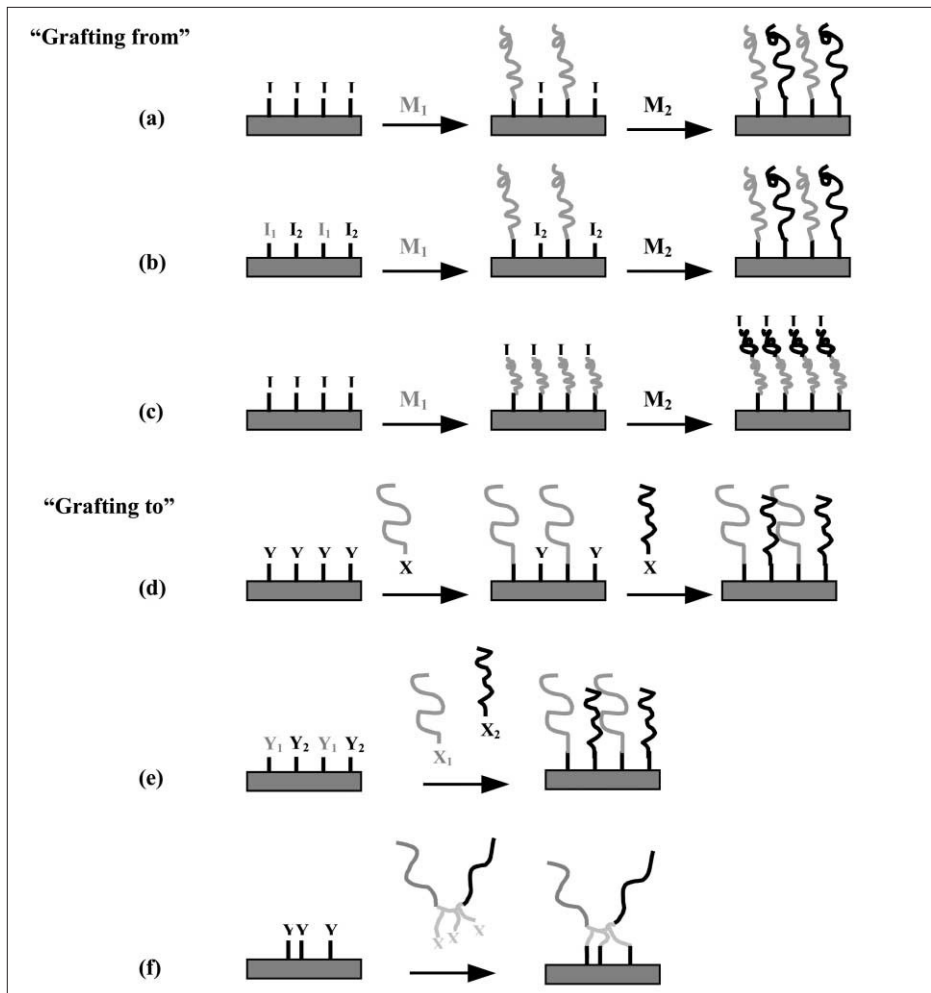


Bild 1. Syntheschema für die Herstellung binärer Polymerbürsten mittels Grafting-from-Methode (a – c) und Grafting-to-Methode (d – f). Abk.: I – Initiator, M – Monomer
 a) Zweistufige Polymerisation mit langsamer Initiierung an der Oberfläche; gleicher Initiator für beide Schritte. b) Zweistufige Polymerisation mit zwei unterschiedlichen an der Oberfläche fest sitzenden Initiatoren. c) „Grafting from“ von Blockcopolymer-Bürsten mittels Lebend-Polymerisation mit einem Initiator und schneller Initialisierung. d) Pfropfung von zwei verschiedenen endgruppenterminierten Homopolymeren auf ein Substrat mit einer Art funktionaler Gruppen in zwei Schritten. e) Simultane Pfropfung von zwei verschiedenen endgruppenterminierten Homopolymeren an verschiedene funktionelle Gruppen mit verschiedenen Pfropfungsmechanismen. f) Immobilisierung von Blockcopolymeren mittels eines spezifischen Ankerblocks.
 Quelle: [5] mit freundlicher Genehmigung von Elsevier.

schicht, die vorher auf das Substrat aufgebracht wurde, und bilden so eine Polymerbürste (vgl. Bilder 1 d – f). Der Vorteil der Methode besteht darin, dass sie relativ einfach durchführbar ist und durch die Verwendung endgruppenterminierter Polymere mit einer engen Molekulargewichtsverteilung sehr definierte Bürsten erzeugt werden können. Der Nachteil ist allerdings, dass die mit dieser Methode erreichbare Pfropfungsdichte begrenzt ist. Das liegt daran, dass die Polymerketten sich nacheinander auf der Haftvermittlungsschicht verankern. Somit muss eine zunehmende Anzahl von Ketten erst durch die Schicht der schon auf der Oberfläche angelagerten Ketten diffundieren, um selbst die Pfropfreaktion durchführen zu können. Da die Barrierewirkung dieser Schicht mit der Schichtdicke steigt, ist die erreichbare Pfropfungsdichte auf relativ niedrige Werte beschränkt. Sie kann jedoch erhöht werden, indem die Anbindungsreaktion der Polymerketten in der Schmelze durchgeführt wird.

Über die Pfropfungsdichte und die Art der verwendeten Polymere können die Eigenschaften der erzeugten Polymerfilme gezielt eingestellt werden. Bei hohen Pfropfungsdichten entstehen stabile (makroskopisch) homogene Filme, da die Ketten so dicht gepackt sind, dass sie sich nicht mehr bewegen können. Bei niedrigeren Pfropfungsdichten hingegen entstehen anpassungsfähige (responsive) funktionale Oberflächen, die in der Lage sind, auf ihre Umgebungsbedingungen zu reagieren bzw. ihre Oberflächeneigenschaften umzuschalten. Ein Beispiel sind Oberflächen, die sowohl

hydrophil (wasseranziehend) als auch hydrophob (wasserabstoßend) wirken können [3 bis 5]. Andererseits darf die Pfropfungsdichte der Polymerketten auf dem Substrat aber auch nicht zu niedrig sein, da sich sonst keine „Bürsten“ ausbilden können. Die Bildung einer Polymerbürste setzt die Wechselwirkung einer Polymerkette mit den benachbarten Polymerketten voraus. Mit anderen Worten müssen sich die Polymerketten gegenseitig „erkennen“, wozu ein Mindestabstand notwendig ist. Sind die Ketten zu weit voneinander entfernt, beeinflusst dies ganz wesentlich die Schalteigenschaften.

3 Eigenschaften von Schichten aus Polymerbürsten

3.1 Reversibles Umschalten zwischen Hydrophilie und Hydrophobie

In Bild 2 ist das Konzept des Schaltens der Oberflächeneigenschaften durch externe Stimuli am Beispiel der Verwendung von Lösungsmitteln unterschiedlicher Qualität für die beiden Komponenten der Bürste dargestellt. Welche Konformation (Gestalt) die Molekülketten im Einzelnen einnehmen, wird durch die Wechselwirkung mit dem umgebenden Medium bestimmt. In guten Lösungsmitteln werden die Ketten vollständig vom Lösungsmittel umgeben und nehmen eine gestreckte Konformation ein. In schlechten Lösungsmitteln dominiert hingegen die Abstoßung zwischen Polymer und Lösungsmittel, sodass die Ketten kolla-

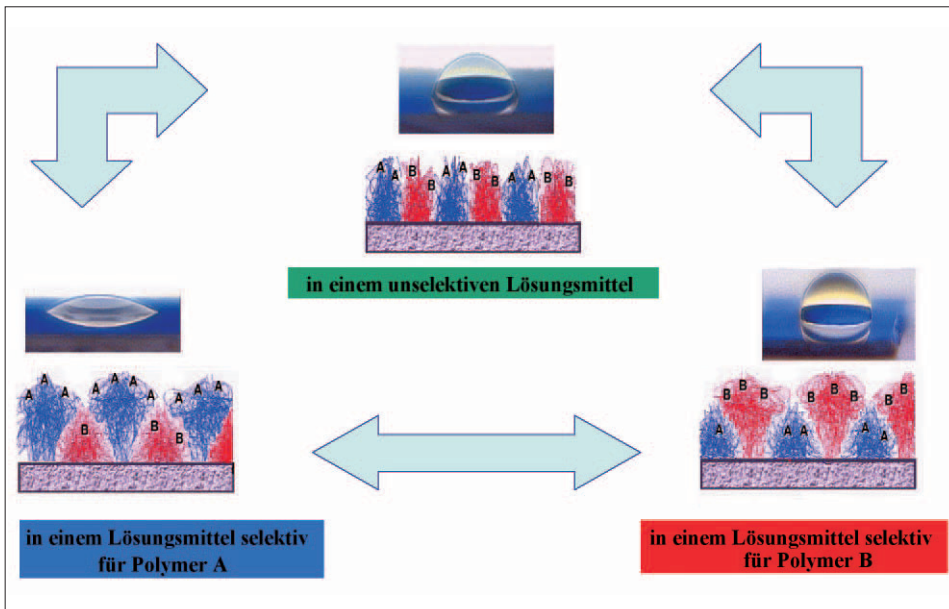


Bild 2. Schematische Darstellung des Schaltens physikochemischer Oberflächeneigenschaften von binären Polymerbürsten in Lösungsmitteln unterschiedlicher Qualität für die Komponenten der Bürste und statische Kontaktwinkel von Wasser auf den Polymerbürstenschichten

bieren und sich zusammenknäulen. Durch die Wahl eines Lösungsmittels kann man somit einstellen, welches der beiden Polymere der Bürste eine gestreckte Konformation einnehmen und somit die Oberflächeneigenschaften des Polymerfilms bestimmen soll. Durch die Variation des umgebenden Mediums kann damit reversibel zwischen den Oberflächeneigenschaften der beiden Komponenten hin- und hergeschaltet werden. Auf diese Weise ist ein Schalten der Morphologie, der Oberflächenfunktionalität, der Filmstärke, der Ladung bzw. zwischen Hydrophilie und Hydrophobie möglich.

Die Schaltamplitude in Bezug auf Hydrophilie und Hydrophobie kann noch verstärkt werden, indem man die Oberfläche mit einer definierten Rauigkeit versieht. Dazu erzeugt man zwei Hierarchieebenen mit strukturierten Oberflächen, wobei eine kleinere Struktur auf eine größere aufgebracht wird: Auf der ersten Ebene wird eine periodische nadelförmige Morphologie auf dem Substrat (Polymer) erzeugt und auf einer zweiten Ebene eine gemischte Polymerbürste kovalent an diese Oberfläche gebunden. Die Eigenschaften solcher Oberflächen können reversibel zwischen Ultrahydrophobie (Kontaktwinkel 150°) und Superhydrophilie (Kontaktwinkel 0°) hin und her geschaltet werden (Bild 3) [6 bis 8]. Dabei gibt der Kontaktwinkel den

Winkel zwischen einem Wassertropfen und der Oberfläche an. Er ist umso kleiner, je wasseranziehender und umso größer, je wasserabweisender eine Fläche wirkt.

3.2 Reversibel schaltbare Oberflächenstrukturen

Binäre Polymerbürsten können auch genutzt werden, um eine schaltbare oder adaptive *Strukturierung* von Oberflächen zu erreichen. Hierfür wird ein Homopolymer, d. h. eines der beiden Polymere der Bürste photovernetzbar gemacht. Die Photolithographie wird in der Mikroelektronik als Standardverfahren zur Herstellung elektronischer Bauteile genutzt. Normalerweise kann man die einmal mittels UV-Strahlung eingebrannte Struktur nicht wieder löschen. Die Verwendung schaltbarer Polymerbürsten macht dies jedoch möglich. Das generelle Konzept dieses neuen Typs der Photolithographie ist in Bild 4 dargestellt: Darin wird der aus einer gemischten Polymerbürste bestehende Film mit einem Lösungsmittel behandelt und danach durch eine Photomaske bestrahlt, sodass die Polymerketten eines Homopolymers in den bestrahlten Bereichen miteinander vernetzen. Da die vernetzten Polymere ihre Struktur nicht mehr verändern können, behält die Bürste nur in den unbestrahlten Bereichen ihre Fähigkeit zu schalten. Auf diese

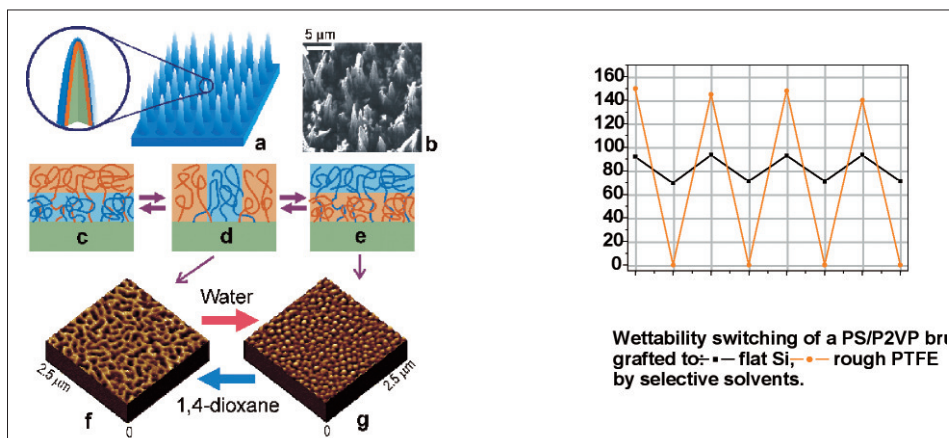


Bild 3. Verstärkung der Schaltamplitude durch hierarchische Strukturierung der Oberfläche des Polymerfilms: Die binäre Polymerbürste wurde auf einem durch Plasmaätzen nadelförmig aufgerauhten PTFE-Film erzeugt (links). Dadurch wurde die Schaltamplitude (Kontaktwinkel von Wasser) von 20° (auf einem glatten Wafer) auf 150° (rechts) vergrößert.

Quelle: [7] (links) mit freundlicher Genehmigung der Amerikanischen Chemischen Gesellschaft (ACS) und [5] (rechts) mit freundlicher Genehmigung von Elsevier.

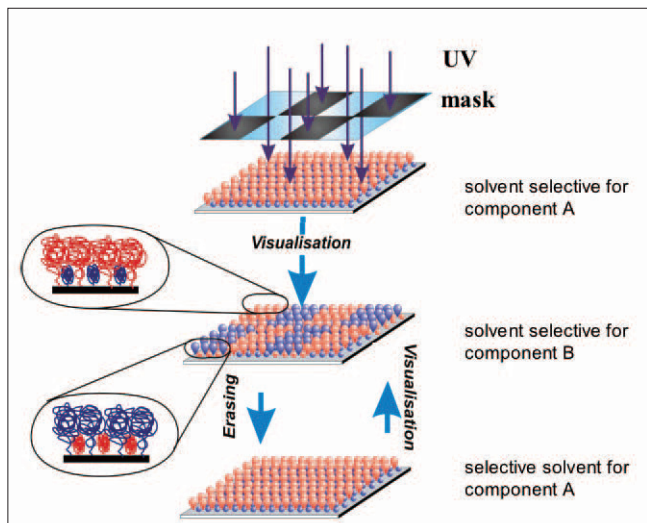


Bild 4. Schematische Darstellung der Photolithographie an gemischten Polymerbürsten.

Quelle: [9] mit freundlicher Genehmigung der Amerikanischen Chemischen Gesellschaft (ACS).

Weise kann ein Oberflächenmuster durch das Schalten mit einem für das andere Homopolymer bestimmten Lösungsmittel erzeugt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lösungsmittelbehandlung eine Phasenseparation und damit eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung der äußeren Schicht des Films nur in den unbestrahlten Bereichen verursacht. Die photovernetzten Bereiche können nicht mehr schalten und behalten den vorherigen Zustand bei. Durch eine erneute Behandlung mit einem Lösungsmittel für das andere Homopolymer kann das Muster wieder gelöscht werden. Dieser Prozess der Entwicklung und Löschung von Mustern ist reversibel und kann mehrere Male wiederholt werden. Die Möglichkeiten dieser neuen Methode der Photolithographie für Zwecke der Benetzungs- bzw. Adsorptionskontrolle können anhand von Beispielen demonstriert werden [9 bis 11]:

In Bild 5 sind charakteristische Bilder dargestellt, die durch die Belichtung einer speziellen Polymerbürste durch eine gabelförmige Photomaske im Mikrometermaßstab entstanden sind. Die Entwicklung des Bildes erfolgte durch

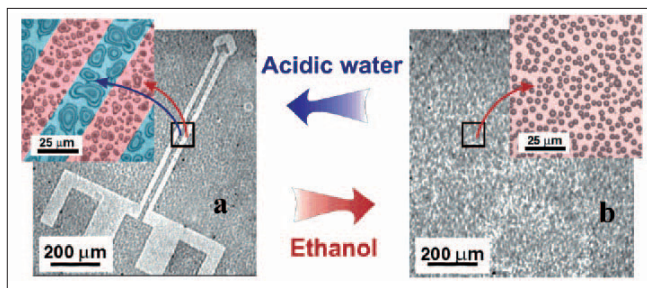


Bild 5. Adsorption von Wassertropfen (optische Mikroskopie) an Polymerbürsten mit entwickeltem (a) und gelöschtem (b) Bild. Die Vergrößerungen zeigen Details. Die hydrophilen Bereiche wurden nachträglich blau und die hydrophoben rot eingefärbt.

Quelle: [9] mit freundlicher Genehmigung der Amerikanischen Chemischen Gesellschaft (ACS).

mehrmaliges Waschen mit verdünnter Säure ($\text{pH} = 02$), Trocknen und anschließender Abscheidung von Tröpfchen aus Wasserdampf (Bild 5a). In der Vergrößerung kann man die unterschiedlichen Benetzungseigenschaften der bestrahlten und unbestrahlten Bereiche sehr gut erkennen. Während die bestrahlten Bereiche kaum benetzt wurden (kleinere, mehr sphärische Tropfen), konnte man ein wesentlich ausgeprägteres Spreiten der Wassertropfen auf den unbestrahlten Gebieten beobachten. Da sich die Lichtreflexion mit der Größe und Gestalt der Wassertropfen ändert, entstand durch Wasserdampfabscheidung auf diesen Filmen ein sehr kontrastreiches Bild. Durch Waschen mit Ethanol kann das Bild gelöscht werden (Bild 5b). Nach derselben Behandlung mit Wasserdampf entstand kein Kontrast. Das Erzeugen und Löschen des Bildes war reversibel und wurde mehrere Male wiederholt. Es konnte gezeigt werden, dass der Film sensitiv auf eine verdünnte Säure reagiert und diese spezifischen Wechselwirkungen wiederholt sichtbar gemacht werden können.

3.3 Schaltbare Benetzbarkeitsgradienten

Benetzungsgradienten sind eine sehr interessante Möglichkeit, die Bewegung von Flüssigkeiten auf Oberflächen und in Mikro- oder Nanokanälen zu steuern. Forschungen am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden haben ergeben, dass binäre Polymerbürsten sehr gut geeignet sind, um solche Benetzbarkeitsgradienten herzustellen. Zuerst verteilt man dazu jedes Polymer so auf einer Fläche, dass dessen Pflropfungsdichte kontinuierlich von einem Flächenende zum anderen zunimmt. Die Pflropfungsdichten beider Polymere steigen dabei in entgegengesetzter Richtung an, sodass an jedem Flächenende jeweils ein Homopolymer vorherrscht. Die Grundidee bestand darin, solche Gradienten der Pflropfungsdichte über Gradienten der chemischen Zusammensetzung der Bürste in Gradienten der Benetzbarkeit umzusetzen, sodass Flächen entstehen, die an einem Ende wasseranziehend und am anderen wasserabweisend wirken. Das gelang durch die Nutzung der Grafting-to-Methode. Die Pflropfungsdichte-Gradienten wurden mit Hilfe einer Apparatur, bei der auf der Oberfläche eines Probenhalters ein bestimmter Temperaturgradient eingestellt werden konnte [12, 13], hergestellt. Diese Apparatur erzeugt einen linearen Temperaturverlauf und wurde benutzt, um das erste Polymer auf die Oberfläche zu pflropfen. Die Oberfläche – ein Siliziumwafer diente als Modelloberfläche – wurde vorher mit einer dünnen Schicht eines haftvermittelnden Substrats modifiziert. Es liefert die funktionellen Gruppen für eine kovalente Anbindung der endfunktionalisierten linearen Polymere, die schließlich die „Bürste“ bilden [14]. Auf diese Weise entstand ein Gradient der Pflropfungsdichte entlang des Temperaturgradienten. Danach wurde das zweite Polymer an die restlichen zugänglichen aktiven Zentren der Haftvermittlerschicht gepflropft – zwei entgegengesetzt verlaufende Gradienten der Pflropfungsdichte wurden erzeugt. Die „Gradienten-Bürsten“ wurden aus Polystyren und einem Polyelektrolyten [12, 13] sowie aus zwei entgegengesetzt geladenen Polyelektrolyten hergestellt.

Binäre Polyelektrolyt-Bürsten sind in der Lage, die Richtung des auf diese Weise erzeugten Benetzbarkeitsgradienten zu ändern. Bild 6 zeigt, dass sich die Ausprägung des Gradienten verringert, wenn der pH-Wert des Umgebungsmediums steigt. In neutralen Medien ($\text{pH} = 5$, Bild 6) kann der Oberflächengradient quasi „ausgeschaltet“ wer-

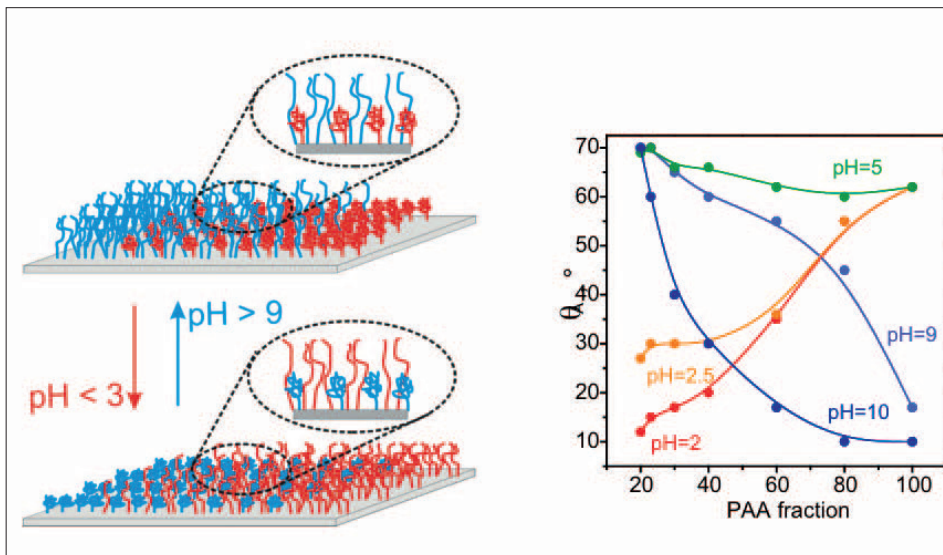


Bild 6. Wasser-Kontaktwinkel in Abhängigkeit vom Anteil an Polyacrylsäure (negativ geladenes Polymer) in der Bürste und vom pH-Wert (rechts) und schematische Darstellung des Schaltens eines Benetzbarkeitsgradienten durch pH-Änderungen der umgebenden Lösung (links).
Quelle: [16] mit freundlicher Genehmigung der Amerikanischen Chemischen Gesellschaft (ACS).

den. Er erscheint erneut nach Behandlung mit basischen wässrigen Lösungen (pH = 9 – 10) allerdings in entgegengesetzter Richtung [13, 14, 16]. Solche Oberflächeneigenschaften sind für mikro- und nanofluidische Anwendungen, z. B. den Transport von Flüssigkeiten und Nanoobjekten in Nanoreaktoren, sehr interessant [17].

4 Zusammenfassung

Durch dünne Schichten end-gepfropfter Polymere können die Oberflächeneigenschaften von Substraten, wie Adhäsion, Lubrikation, Benetzbarkeit, Reibung und – nicht zuletzt – Biokompatibilität, dramatisch verändert werden, so dass solche Techniken zunehmend mehr Aufmerksamkeit finden. Dabei weisen die vielversprechendsten Systeme eine Bürsten-Struktur auf. Besonders binäre, d. h. zweikomponentige Polymerbürsten haben ein großes Potenzial für die Erzeugung einer Vielzahl von Nanometer-Strukturen sowie generell für ein gezieltes Oberflächendesign. Dies kann durch die Variation der entscheidenden Parameter (Pflanzdichte, Kettenlänge, chemische Eigenschaften der Kette) realisiert werden. Homogene Polymer-Bürsten werden bereits seit längerer Zeit untersucht und sind gründlich theoretisch betrachtet worden, wohingegen binäre Polymerbürsten erst in jüngster Zeit experimentell erforscht werden. Es wurde gezeigt, dass Oberflächen mit Hilfe dieser Art der Modifizierung sowohl mit reversibel schaltbaren als auch adaptiven physiko-chemischen Oberflächeneigenschaften (Benetzbarkeit, Morphologie, Oberflächenladung etc.) und Oberflächenstrukturen mit Hilfe von Oberflächengradienten hergestellt werden können, die für eine Vielzahl von Anwendungen prädestiniert sind. Dieses Konzept der Oberflächenmodifizierung ist auf einer Vielzahl von Substraten sowie auch mit Partikeln realisierbar. Eine interessante Anwendung wäre zum Beispiel die Herstellung von anschmutzungsarmer Arbeitskleidung, die trotzdem waschbar ist.

Literatur

- [1] Avincola, R. C.; Brittain, W. J.; Caster, K. C.; Rühle, J.: Polymer Brushes. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. Urban, M. W. (Hrsg.): Stimuli-Responsive Polymeric Films and Coatings. ACS Sympos. Ser. **912**. Washington DC: Am. Chem. Soc., 2005. Minko, S. (Hrsg.): Responsive Polymer Materials. Ames: Blackwell Publ., 2006
- [2] Klep, V.; Minko, S.; Luzinov, I.: In: Polym. Mater. Sci. Eng. **89** (2003), S. 248 – 249. Rühle, J. et al.: Polyelectrolyte Brushes. In: Advances in Polymer Sci. **165** (2004), S. 79 – 150
- [3] Draper, J.; Luzinov, I.; Ionov, L.; Minko, S.; Varshney, S. K.; Stamm, M.: In: Polymer Preprints **44** (2003) 1, S. 570 – 571. Minko, S.; Usov, D.; Luchnikov, V.; Müller, M.; Ionov, L.; Scholl, A.; Pfütze, G.; Stamm, M.: In: Polymer Preprints **44** (2003) 1, S. 478 – 479
- [4] Minko, S.; Müller, M.; Motornov, M.; Nitschke, M.; Grundke, K.; Usov, D.; Scholl, A.; Luchnikov, V.; Stamm, M.: In: J. Am. Chem. Soc. **125** (2003) 13, S. 3896 – 3900
- [5] Uhlmann, P.; Ionov, L.; Houbenov, N.; Nitschke, M.; Grundke, K.; Motornov, M.; Minko, S.; Stamm, M.: In: Progress in Organic Coatings **55** (2006), S. 168 – 174
- [6] Nitschke, M.; Minko, S.; Motornov, M.; Grundke, K.; Stamm, M.: Oberflächen mit schaltbarer Ultrahydrophobie und Verfahren zur Realisierung. DE10206481, EP1350575
- [7] Minko, S.; Müller, M.; Motornov, M.; Nitschke, M.; Grundke, K.; Stamm, M.: In: J. Am. Chem. Soc. **125** (2003), S. 3896
- [8] Grundke, K.; Nitschke, M.; Minko, S.; Stamm, M.; Froeck, C.; Simon, F.; Uhlmann, S.; Pöschel, K.; Motornov, M.: In: Mittal, K. L. (Hrsg.): Contact Angle, Wettability and Adhesion. Bd. 3. VSP International Science Publishers 2003. S. 267 – 291
- [9] Ionov, L.; Minko, S.; Stamm, M.; Gohy, J.-F.; Jérôme, R.; Scholl, A.: In: J. Am. Chem. Soc. **125** (2003), S. 8302 – 8306
- [10] Ionov, L.; Stamm, M.; Minko, S.; Hoffmann, F.; Wolff, T.: In: Macromol. Symp. **207** (2004), S. 229 – 236
- [11] Hoffmann, F.; Wolff, T.; Minko, S.; Stamm, M.: In: J. Colloid Interface Sci. **282** (2005) 2, S. 349 – 358
- [12] Zdyrko, B.; Klep, V.; Luzinov, I.; Minko, S.; Sydorenko, A.; Ionov, L.; Stamm, M.: In: Polymer Preprints **44** (2003) 1, S. 522
- [13] Ionov, L.; Houbenov, N.; Sydorenko, A.; Minko, S.; Stamm, M.: Polymeric Materials. In: Science & Engineering **90** (2004), S. 104
- [14] Ionov, L.; Sydorenko, A.; Stamm, M.; Minko, S.; Zdyrko, B.; Klep, V.; Luzinov, I.: In: Macromolecules **37** (2004), S. 7421 – 7423
- [15] Ionov, L.; Houbenov, N.; Sydorenko, A.; Minko, S.; Stamm, M.: In: Macromol. Rapid Commun. **25** (2004), S. 360 – 365
- [16] Ionov, L.; Houbenov, N.; Sydorenko, A.; Stamm, M.; Luzinov, I.; Minko, S.: In: Langmuir **20** (2004) 23, S. 9976 – 9979
- [17] Ionov, L.; Houbenov, N.; Sydorenko, A.; Stamm, M.; Minko, S.: In: Advanced Functional Materials **16** (2006), S. 1153 – 1160

Manuskripteingang: 30.8.2006
Angenommen am: 6.11.2006

**Uhlmann, Petra****Dr. rer. nat.**

Studium Chemie von 1981 bis 1986 an der TU Dresden ♦ 1992 Promotion zur Dr. rer. nat. ♦ seit 1993 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.

**Houbenov, Nikolay****Ph. D.**

Studium Chemie an der Universität von Sofia/Bulgarien und der University Jaime I, Castellon/ Spanien ♦ 1997 Studienabschluss als M. Sc. ♦ 2005 Postdoktorand am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden ♦ 2005 Promotion zum Ph. D. ♦ Forschungsstipendiat der Marie-Curie-Stiftung in der „Molecular Materials Group“ an der Technischen Universität Helsinki, Finnland

**Minko, Sergiy****Prof. Ph. D.**

1983 Promotion zum Ph. D. an der National University of Technology, Lviv/Ukraine ♦ wissenschaftlicher Mitarbeiter an der National Academy of Science in der Ukraine, an der Universität Ulm, am Charles Sadron Institute in Strasbourg/Frankreich sowie am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz ♦ von 2000 bis 2003 Leiter der „Nanostructured Materials Group“ am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden sowie von 2003 bis 2006 an der Clarkson University, Potsdam/NY ♦ Professor am Department of Chemistry an der Clarkson University

**Ionov, Leonid****Ph. D.**

Studium Chemie von 1994 bis 1999 an der Staatlichen Universität Moskau ♦ von 1999 bis 2001 Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis in Moskau ♦ von 2002 bis 2004 Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden ♦ 2005 Promotion zum Ph. D. ♦ seit 2005 Max-Planck-Institut für Molekulare Zellbiologie und Genetik Dresden

**Stamm, Manfred****Prof. Dr. rer. nat. habil.**

Studium Physik von 1968 bis 1974 an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main ♦ 1979 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1993 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ seit 1999 Professor für Physikalische Chemie polymerer Materialien am Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden, und Teilinstitutsleiter am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.

**Motornov, Mikhail****Ph. D.**

2004 Promotion zum Ph. D. an der TU Dresden ♦ Postdoctoral Fellow in der „Nanostructured Materials Group“ an der Clarkson University, Potsdam/NY