

Kontrollierte Selbstorganisation

Vom Naturprinzip zur technologischen Anwendung

Andreas Hoffknecht und Dietmar Wechsler

Selbstorganisation ist eines der Grundprinzipien für Strukturbildung und Wachstum in der Natur: Einzelne Bausteine fügen sich zu wohlgeordneten, funktionierenden Einheiten zusammen. Die Selbstorganisation für technische Anwendungen zu erschließen, verspricht bei niedrigen Kosten einfache und effizientere Strukturierungsverfahren, neue Prozesstechnologien und Fertigungsmethoden, aber auch die Beherrschung einer Komplexität, die mit konventionellen Methoden nicht zugänglich ist.

Verantwortlich für selbstorganisierte Ordnungsprozesse sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bausteinen, seien es Atome, Moleküle, Molekülverbände oder Partikel. Beispiele sind in der Natur allgegenwärtig. Einfache Gebilde, wie eine Schneeflocke, oder komplexe, wie eine lebende Zelle, entstehen allein aus „Anweisungen“, die implizit im Ausgangsmaterial enthalten sind.

Redet man von der technologischen Nutzung der Selbstorganisation, muss man sich zunächst von der Vision verabschieden, es könne sich z. B. ein komplexer Prozessor durch einfaches Zusammenschütten geeigneter Chemikalien und etwas Schütteln in vitro selbstorganisiert bilden. Tatsächlich kann die kontrollierte Selbstorganisation aber in vielen Herstellungsprozessen einzelne Prozessschritte ersetzen und wird z. B. zu effizienteren organischen Displays, zu billigeren Funketiketten für den Massenmarkt sowie zu leistungsfähigeren Speichern führen. Das potenzielle Anwendungsspektrum ist breit gefächert und reicht von Produktions- und Verfahrensprozessen für Produkte der Informations- und Kommunikationstechnologie über Werkstoff- und Umwelttechnik bis hin zur Medizin und Pharmazie.

In diesem Artikel werden ausschließlich solche Phänomene und Mechanismen diskutiert, die sich mit der Selbstorganisation (engl.: self-assembly) zum gezielten Aufbau materieller Objekte befassen.

Kontrolle klingt im Zusammenhang mit Selbstorganisation zunächst widersprüchlich. Es gibt aber zwei Instrumente, die ein gewünschtes Endergebnis sicherstellen. Zum einen lässt sich die Strukturinformation auf die einzelnen Bausteine „aufprägen“. Dies kann z. B. einfach durch die geometrische Form, ausgewählte Bindungsplätze oder auch durch die Oberflächenbeschaffenheit der Bausteine geschehen. Der Herstellungsprozess läuft dann von alleine ab, sobald die Bausteine zusammgeführt werden.

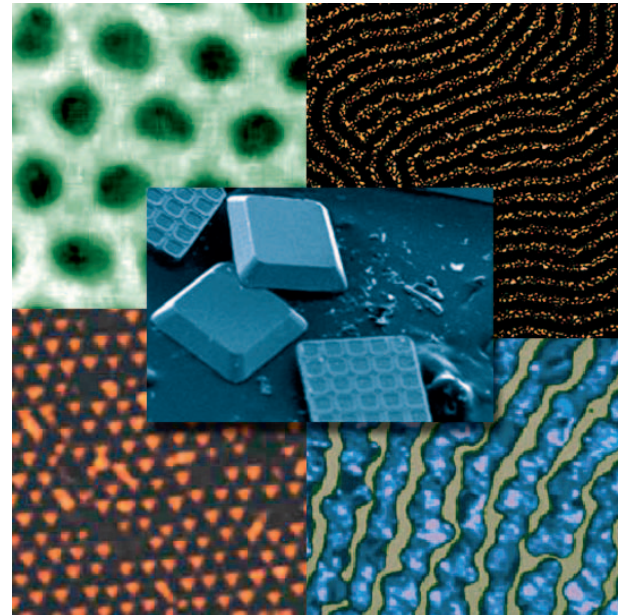
Man kann aber auch, und dies ist die zweite Manipulationsmöglichkeit, die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Druck, pH-Wert, elektromagnetische Felder und Konzentrationen kontrollieren.

Die Selbstorganisation beruht häufig auf dem Wirken relativ schwacher Kräfte. Bei der molekularen Selbstorganisation spielen z. B. nicht-kovalente Bindungen eine entscheidende Rolle. Dadurch ist ein leichter Auf- und Abbau der einzelnen Bausteine möglich, und zufällig entstandene Fehler können korrigiert werden. Der Selbstorganisationsprozess ist also quasi selbstkorrigierend und ermöglicht Zielstrukturen mit hoher Präzision.

Strategische Ausgangspunkte

Um bei der Vielfalt der untersuchten Selbstorganisationsphänomene den Überblick zu behalten und eine Konzentration auf die wesentlichen Strategien und Synergiepotenziale zu ermöglichen, hat die Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (www.zt-consulting.de) im Rahmen ihrer Technologiefrüherkennung für das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eine Technologieanalyse durchgeführt.^{1,2)} Hierbei wurden fünf „Kristallisationskeime“ identifiziert, die als disziplinübergreifende Impulsgeber und innovative Ausgangspunkte für das Gebiet der kontrollierten Selbstorganisation fungieren können:

► Hybride Strukturierungsverfahren,



Mit Selbstorganisation lassen sich unterschiedlichste Strukturen herstellen, die attraktive technologische Anwendungen versprechen. (Quellen: MPI-FKF; IBM; U Chicago (2); Alien Technology)

- Montage mesoskopischer Bauelemente,
- Selbstorganisation von Quantenpunkten und Nanokristallen,
- Selbstorganisation von Blockcopolymeren,
- Biofunktionale Erkennung für neuartige Konstruktions- und Produktionsverfahren.

Im Folgenden werden die analysierten Ansätze kurz vorgestellt.

Hybride Strukturierungsverfahren

Unter hybriden Strukturierungsverfahren versteht man die Kombination konventioneller Strukturierungsmethoden mit Selbstorganisationsprozessen. Ziel ist, die spezifischen Vorteile beider Ansätze zu nutzen bzw. ihre Nachteile zu umgehen.

Konventionelle Verfahren, wie die optische Lithographie, ermöglichen eine exzellente Kontrolle über die laterale Position, an der eine Struktur auf einer Oberfläche erzeugt wird. Dagegen ist die Auflösung begrenzt, und die notwendigen Masken werden besonders bei zukünftigen Generationen zu einem wichtigen Kostenfaktor. Maskenlose Technologien, wie Elektronen- und Ionenstrahlolithographie, sind für viele Anwendungen zu langsam. Die

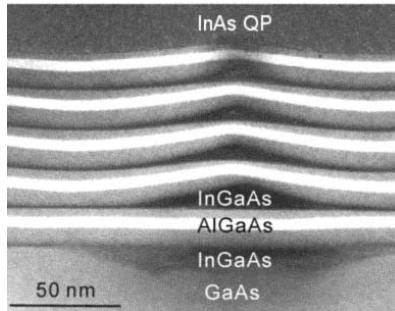
1) H. Eickenbusch, A. Hoffknecht, D. Holtmannspöter, V. Wagner und A. Zweck, Ansätze zur technischen Nutzung der Selbstorganisation, Zukünftige Technologien Bd. 48, ISSN 1456-5928 (2005)

2) H. Eickenbusch, A. Hoffknecht, D. Holtmannspöter und D. Wechsler, Kontrollierte Selbstorganisation für zukünftige technische Anwendungen, Zukünftige Technologien Bd. 55, ISSN 1456-5928 (2004)

Dr. Andreas Hoffknecht, ZT-Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH; Dr. Dr. Dietmar Wechsler, VDI Technologiezentrum GmbH, Physikalische Technologien, Graf-Recke-Str. 84, 40239 Düsseldorf

Selbstorganisation ist demgegenüber kostengünstiger. Sie ermöglicht Auflösungen unter 10 nm, aber keine Kontrolle über die exakte laterale Position, an der eine Struktur auf einer Oberfläche entsteht. Zudem sind im Wesentlichen nur periodische Strukturen möglich. Prinzipiell lassen sich zwei Ansätze zu hybriden Strukturierungsverfahren unterscheiden:

Abb. 1:
Auf einem vorstrukturierten GaAs-Substrat lässt sich ein InAs-Quantenpunkt zielgenau abscheiden. (Quelle: O. G. Schmidt, MPI-FKF)



► Der erste Ansatz versucht, durch Einsatz klassischer Verfahren dem anschließenden Selbstorganisationsprozess die lateralen Positionen aufzuprägen (Vorstrukturierung). Beispielsweise lässt sich durch Vorstrukturierung eines Ni-Katalysators die laterale Position der anschließend gewachsenen Kohlenstoff-Nanoröhren definieren.³⁾

Ein Lithographie-Schritt kann auch die Ordnung von anschließend gewachsenen Quantenpunkten (QP) kontrollieren. Abb. 1 zeigt hierzu ein Beispiel, bei dem in ein GaAs-Substrat mittels Lithographie zunächst Löcher geätzt werden.⁴⁾ Das anschließend abgeschiedene InGaAs sammelt sich bevorzugt in den Löchern an. Dadurch wird die nachfolgende Schicht gedehnt. Diese Inhomogenität pflanzt sich durch den Schichtaufbau fort und wirkt als Keim für die zielgenaue Abscheidung des QP. Nach Angaben der Autoren ist dieses Konzept u. a. aussichtsreich für den Einsatz in Feldeffekttransistoren (mit Ge-QP auf einem Si-Substrat) und verspricht gegenüber der „strained Si-Technologie“ geringere Defektdichten, geringere Schichtdicken und eine bessere Wärmeleitfähigkeit. Ein Nachteil der Vorstrukturierung durch Lithographie besteht darin, dass der minimale Abstand der Strukturen weiterhin durch die Auflösung der Lithographie bestimmt wird.

► Die zweite Möglichkeit, die Selbstorganisation gewinnbringend mit konventionellen Methoden zu kombinieren, nutzt selbstorganisierte Strukturen als Maske bzw. Templat für einen anschließenden

Ätz- oder Abscheideprozess. Dabei sind Strukturgrößen möglich, die lithographisch nicht zugänglich sind. Dieses Konzept verspricht überall dort Vorteile, wo kostengünstig relativ einfache periodische Strukturen erforderlich sind, also z. B. bei Halbleiterspeichern, in Wellenleitern, Filtern, bei hochdichten magnetischen Speichern oder auch bei Biochips.

IBM stellte 2003 ein Verfahren vor, bei dem ein selbstorganisierter Blockcopolymer-Film als Maske für einen Ätzprozess dient (Abb. 2).⁵⁾ Die Forscher entwickeln diese Methode zur Herstellung von „nanocrystal flash“-Speichern. Bereits 2001 hat IBM ein ähnliches Verfahren für die Herstellung der Kondensatoren von DRAM vorgeschlagen.⁶⁾ Dazu wird eine verdünnte Lösung von Diblockcopolymeren in einem Spin-Coating-Verfahren auf eine Oberfläche aufgebracht und ausgeheilt. Das Diblockcopolymer enthält Polystyrol (PS) und Polymethylmethacrylat (PMMA) und bildet eine dicht gepackte hexagonale Struktur von PMMA-Zylindern in der PS-Matrix (Abb. 2a). Anschließend wird das PMMA weggeätzt. Zurück bleibt die PS-Matrix (b), deren Struktur in einem Ätzprozess auf die darunter liegende Oxidschicht übertragen wird (c). Eine Deposition von amorphem Silizium führt schließlich zu den Nanokristallen mit ca. 20 nm Durchmesser (d, e). Diese Größe wird letztlich durch die Molekulargewichte der verwendeten Polymere bestimmt, sodass die Technologie Potenzial

für eine zukünftige Skalierung bietet. Vorteile gegenüber alternativen Methoden, wie Ionen-Implantation, CVD oder Aerosol-Deposition, sind die scharfe Größenverteilung der Nanokristalle und ihre regelmäßige Anordnung.

Montage mesoskopischer Bauelemente

Die Montage einzelner Bauelemente in ein integriertes System ist eine wachsende Herausforderung. Mit der fortschreitenden Miniaturisierung in der (Opto-)Elektronik werden auch die Bauelemente, die auf einem Chip montiert werden müssen, immer kleiner. Bei diesen Bauelementen kann es sich z. B. um LED, Dioden, mikrosystemtechnische Komponenten wie Mikro- bzw. Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme (MEMS bzw. MOEMS) sowie μ -Sensoren oder RF-IC handeln. Besonders bei sehr kleinen Bauelementen stoßen serielle Methoden (z. B. „Pick&Place“, Lichtpinzette, AFM, „Dip Pen“) an ihre Grenzen. Experten sprechen vom sog. „packaging gap“ bzw. einer „Assembly“-Krise in der Elektronik.

International arbeiten verschiedene Gruppen an der Nutzung der Selbstorganisation für die Montage mesoskopischer Bauelemente. Der eigentliche Montage-Prozess lässt sich in zwei Schritte unterteilen (Abb. 3). Im ersten Schritt müssen die Bauelemente an den Montageort gelangen. Dies kann statistisch durch Diffusionsprozesse oder gezielter durch elektrische oder magnetische Felder geschehen. In

3) K. B. K. Teo et al., Appl. Phys. Lett. 79, 1534 (2001)

4) O. G. Schmidt et al., Surface Science 514, 10 (2002)

5) K. Guarini et al., International Electron Devices Meeting, IEEE Kat.-Nr.: 03CH37457, ISBN: 0-7803-7872-5 (2003)

6) C. T. Black et al., Appl. Phys. Lett. 79, 409 (2001)

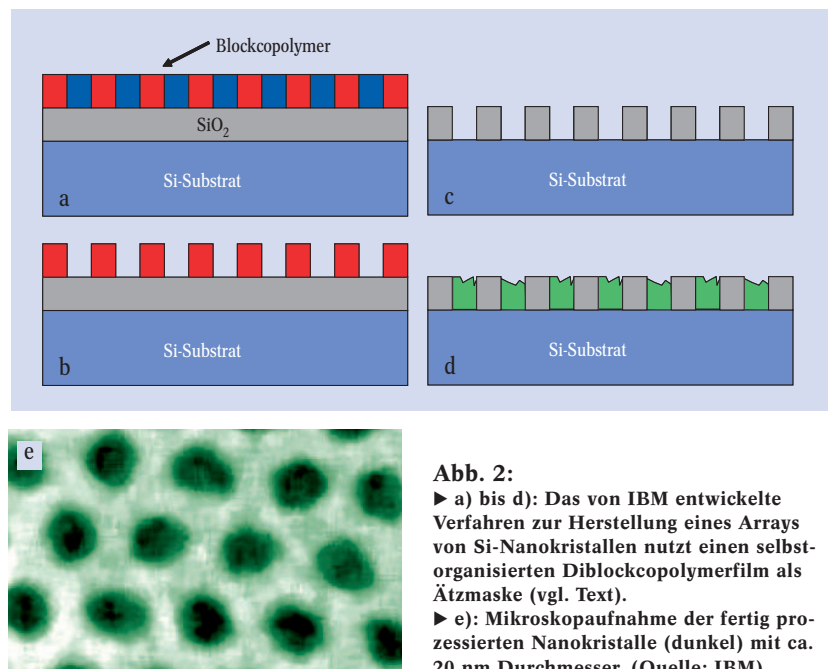


Abb. 2:
► a) bis d): Das von IBM entwickelte Verfahren zur Herstellung eines Arrays von Si-Nanokristallen nutzt einen selbstorganisierten Diblockcopolymerfilm als Ätzmaske (vgl. Text).
► e): Mikroskopaufnahme der fertig prozessierten Nanokristalle (dunkel) mit ca. 20 nm Durchmesser. (Quelle: IBM)

diesem Prozessschritt kommt es vor allem auf eine hohe Parallelität und eine hohe Geschwindigkeit an. Die Geschwindigkeit kann möglicherweise dadurch erhöht werden, dass die Bauteile, etwa durch Tintenstrahl- oder andere Druckverfahren, bereits in der Nähe der Montageorte auf das Substrat aufgebracht werden.

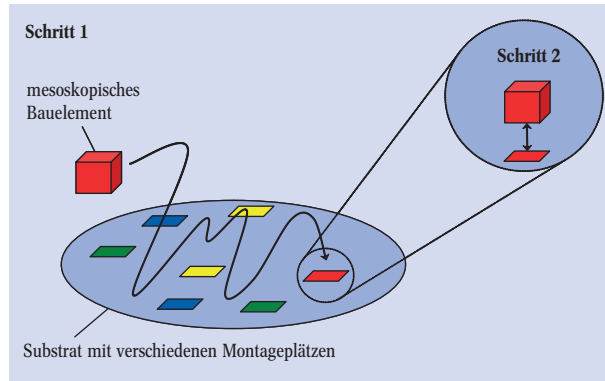


Abb. 3: Prinzip der Montage mesoskopischer Bauelemente. In Schritt 1 nähert sich das Bauelement seinem Montageort. In Schritt 2 wirken nahreichweitige Kräfte, die das Bauelement ausrichten und fixieren.

Vorstellbar ist auch, dass die Bauelemente, in einem Tropfen gelöst, durch akustische Oberflächenwellen in die Nähe des Montageortes transportiert werden. Diese Methode setzt die deutsche Firma Advalytix AG bereits bei Biochips ein.

Sind die Bauelemente nahe genug am Montageort, wirken im zweiten Schritt nahreichweitigere Wechselwirkungen wie Oberflächenspannungen oder biologische bzw. chemische Bindungsmechanismen. Diese bewegen das Bauteil in die gewünschte Position. Hier ist vor allem eine hohe Selektivität, eine genaue Ausrichtung und eine geringe Fehlerquote entscheidend. Die Verdrahtung des Bauelements geschieht in der Regel in weiteren Prozessschritten.

Setzt sich das Bauelement an einem falschen Platz ab oder verankert es sich an seinem Montageort, muss ihm, z. B. durch die Strömung des Lösungsmittels, Vibrationen oder auch Erwärmung, genau soviel Energie zugeführt werden, dass es dieses lokale Minimum verlassen kann. Damit sich dabei andere Bauelemente nicht von ihrem globalen Energieminimum, dem richtigen Montageort, wieder lösen, muss die Energiedifferenz zwischen dem globalen und dem tiefsten lokalen Energieminimum möglichst groß sein.

Die Firma Alien Technology nutzt bereits einen Selbstorganisationsprozess zur kostengünstigen Herstellung von RFID-Tags, elektronischen Funketiketten, die berührungslos ausgelesen werden

können. Ein RFID-Tag besteht aus einem IC und einer Antenne. Alien Technology montiert mit diesem Verfahren die ICs in einem parallelen Prozess auf das Substrat, auf dem die Antennen konventionell hergestellt wurden. Die speziell geformten ICs strömen in einer Lösung über das Substrat. Fällt ein

Bauelement in eine zu seiner Form passende Ausbuchtung, schließt es bündig mit der Substratoberfläche ab – die Flüssigkeit hat keinen Angriffspunkt mehr. Sitzt das Bauelement hingegen nicht richtig an seinem Montage-Platz, wird es von der Flüssigkeitsströmung wieder mitgerissen (Abb. 4).

Quantenpunkte und Nanokristalle

Die Heteroepitaxie sowie diverse nasschemische Verfahren sind die wesentlichen technischen Prozesse, mit denen Quantenpunkte bzw. Nanokristalle hergestellt und in eine gewünschte strukturelle Anordnung gebracht werden. Hierbei werden gezielt Selbstorganisationsphänomene ausgenutzt, die sich z. B. über die Depositionsrate, die Gitterfehlpassung, Temperatur, elektrische Felder, Lösungsmittel, Konzentrationsverhältnisse etc. beeinflussen lassen. Die Anwendungsoptionen sind vielfältig und reichen von neuartigen Bauteilen für die Informations- und Kommunikationstechnik bis hin zu magnetischen Informationsspeichern, Leuchtdioden und Farbdisplays.

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass die Selbstorganisationsprozesse und -parameter nicht nur die strukturellen Aspekte bestimmen, sondern auch die (quanten-) physikalischen Eigenschaften beeinflussen, die für geplante Anwendungen von großer Bedeutung sind (z. B. spezielle Emissionscharakteristika).

Blockcopolymer

Blockcopolymer bestehen aus zwei oder mehreren Polymerbausteinen, die miteinander verknüpft sind. Die Selbstorganisationsprozesse zur Bildung der strukturellen Vielfalt auf Basis von Blockcopolymeren sind mittlerweile gut verstanden. In Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen, wie z. B. Temperatur und pH-Wert, polymerisieren sie in verschiedensten Strukturen wie stäbchen-, kugel- und scheibchenförmigen Mizellen oder Vesikeln.

Das Anwendungspotenzial ist umfassend und schließt u. a. Mikro- und Nanoreaktoren, Wirkstoffträger, Membranen und Sensorkomponenten ein. Bestimmte Blockcopolymer weisen zudem funktionale Eigenschaften wie z. B. Photoadressierbarkeit auf, wodurch sich weitere Anwendungsoptionen im Bereich der optischen Technologien und der Adaptronik ergeben.⁷⁾ Aus Blockcopolymeren lassen sich auch Template bilden, auf denen z. B. selektiv Nanopartikel oder Nanodrähte abgeschieden werden können. Auf die Verwendung als Maske für einen Ätzprozess wurde bereits im Abschnitt „Hybride Strukturierungsverfahren“ eingegangen.

Biofunktionale Erkennung

Auf Basis biofunktionaler Erkennungsprinzipien werden Verfahren erprobt, die es mittel- bis langfristig ermöglichen sollen, kleinste Strukturen kontrolliert aufzubauen. Tech-

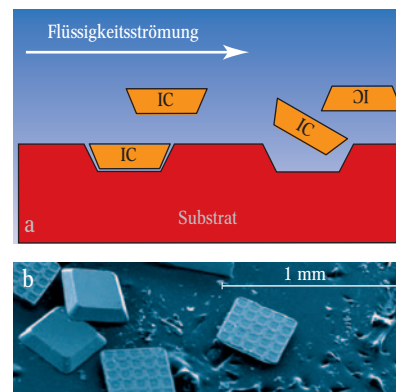


Abb. 4: ▶ a) Schema des Selbstorganisationsverfahrens, das Alien Technology zur Montage von ICs für RFID-Tags anwendet. ▶ b) SEM-Aufnahme der ICs. (Quelle: Alien Technology)

nische und wirtschaftliche Grenzen von top-down-Konstruktionsverfahren, wie die optische Lithographie, sollen durch solche bottom-up-Prozesse kompensiert werden.

DNA-Moleküle gelten hierbei als das zentrale Konstruktionsmittel. Ein DNA-Einzelstrang verfügt über eine bestimmte Abfolge der Basen Adenin (A), Thymin (T), Cytosin (C), Guanin (G) und bindet spezifisch nur an solche DNA-Stränge,

7) vgl. Kap. 3.5 in „Kontrollierte Selbstorganisation ...“, siehe Fußnote 2

die eine komplementäre Basenfolge aufweisen (A ist jeweils komplementär zu T, ebenso C zu G, z. B. würden die Stränge AAGC und TTCG ein Bindung eingehen). Über diese Mechanismen können bei geeignet vorgegebenen DNA-Strängen gezielt komplexe Strukturen aufgebaut werden; man spricht in

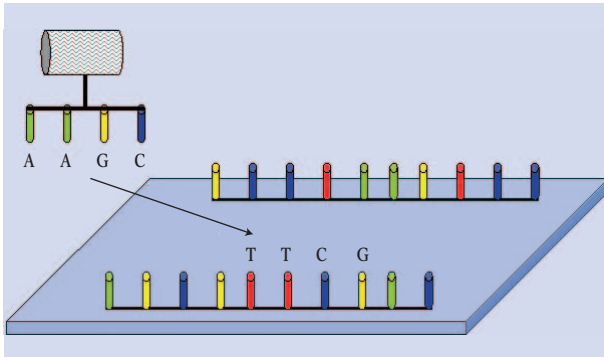


Abb. 5: Ein technisches Bauteil (z. B. eine Kohlenstoff-Nanoröhre), die an den DNA-Einzelstrangabschnitt AAGC gekoppelt ist, bleibt nur an der Stelle TTCG auf einer mit DNA-Abschnitten versehenen Oberfläche haften. Leitende Verbindungen lassen sich z. B. über die gezielte Kopplung weiterer DNA-Moleküle, die anschließend metallisiert werden, realisieren.

diesem Zusammenhang auch von „programmierter Selbstorganisation“. Funktionalisiert man zudem DNA-Moleküle mit technischen Materialien und lokalisiert komplementäre Bindungsstränge auf entsprechenden Oberflächen, sollten sich auf diese Weise z. B. nanoelektronische Verschaltungen herstellen lassen (Abb. 5). Um dieses Ziel zu erreichen, muss trotz der bereits bestehenden Ansätze für entsprechende Produktionsverfahren⁸⁾ noch viel Forschungsarbeit geleistet werden.

Die Selbstorganisationseigenschaften von DNA-Molekülen werden auch für die Herstellung von Biochips und molekularen Maschinen, für Sortierprozesse, für chemische Synthesen und zur Vervielfältigung spezieller DNA-Nanokonstrukten genutzt. Selbst die Möglichkeit einer funktionalisierten Polymerase-Kettenreaktion (auf Basis von Nukleotidbausteinen, die mit technischen Materialien gekoppelt wurden) dürfte bald in ersten Forschungsprojekten untersucht werden.

Auch andere Biomoleküle verfügen über kontrolliert einsetzbare Selbstordnungsfunktionalitäten. Hierzu gehören insbesondere Proteine, die überdies bei der Funktionalisierung von DNA-Strängen als Bindeglied zu technischen Materialien zum Einsatz kommen. Selbst Bakterien und Viren können zum

Aufbau bestimmter Strukturen und Objekte eingesetzt werden. So hat A. Belcher (MIT, USA) mit ihrem Team bereits eine Technologie entwickelt, um über die Bindungs- und Selbstordnungseigenschaften von Viren magnetische oder halbleitende Nanodrähte herzustellen.⁹⁾ Nicht zuletzt ist auch das Selbstordnungspotenzial von Neuronen und neuronalen Netzwerken Gegenstand vieler Forschungsvorhaben. Hierbei wird versucht, ihr Wachstum in technischen Umgebungen zu kontrollieren, stabile neurotechnologische Schnittstellen zu etablieren und insbesondere das neuronale Geflecht elektromagnetisch oder chemisch zu adressieren bzw. dessen Reaktion auf externe Reize (z. B. zum Test der Wirksamkeit pharmazeutischer Substanzen) über Oberflächenkontakte zu einem Mikrochip auszuwerten.

Bereits bestehende Aktivitäten seitens der Großindustrie weisen darauf hin, dass der biofunktionalen Erkennung eine hohe Bedeutung für den Einsatz in technischen Prozessen zugeschrieben wird, obwohl hierfür noch viele Entwicklungsschritte erforderlich sein werden. Die weitere Entschlüsselung und Anwendung biofunktionaler Mechanismen wird selbstverständlich auch die medizinische Therapie und Diagnose, Implantattechnologie und insbesondere das Tissue Engineering voranbringen können.

Fazit

Die technische Nutzung der Selbstorganisation steckt zwar noch in den Kinderschuhen, sie ist aber längst keine Utopie mehr. Die Selbstorganisation kann zur Kosteneffizienz, eventuell auch zu einer nachhaltigeren Produktion beitragen. Zudem ermöglicht sie Strukturen, die anders nicht zugänglich wären.

Sowohl bei den wissenschaftlichen Veröffentlichungen als auch bei den Patenten nimmt Deutschland weltweit nach den USA und Japan den dritten Rang ein. Diese gute Ausgangsposition ist nicht zuletzt das Ergebnis der bisher erfolgten breiten DFG-Förderung, u. a. in verschiedenen Schwerpunktprogrammen und Sonderforschungsbereichen. In vielen weiteren öffentlichen Förderprogrammen aus den Bereichen Physik, Chemie und Biologie sind Selbstorganisationsphänomene zumindest als Teilaspekt miteinbezogen. In der Grundlagenforschung sind damit zahlreiche Verfahren

dem Prinzip nach erfolgreich erforscht worden, die nun weiter ausgebaut und zur Anwendungsreife geführt werden können.

Dies zeigt sich auch in einem wachsenden Industrieinteresse. In Deutschland forschen unter anderem DaimlerChrysler, Merck, Infineon und Siemens mit dem Ziel, Selbstorganisationsprozesse industriell nutzbar zu machen. Beispiele sind das selbstorganisierte Wachstum auf Silizium, die Herstellung photonischer Kristalle oder die selbstorganisierte Anordnung chemisch und biologisch funktionalisierter Kohlenstoff-Nanoröhren. Die ersten kommerziellen Anwendungen der kontrollierten Selbstorganisation sind dort zu erwarten, wo sie in einen konventionellen Herstellungsprozess integriert wird. Diese Kombination ist Gegenstand der ersten beiden Kristallisationskeime, die eher prozessorientiert sind. Die technische Nutzung von Selbstorganisationsphänomenen könnte konkrete Probleme in verschiedenen Anwendungsfeldern lösen und verspricht ein hohes wirtschaftliches Potenzial. Bei hybriden Strukturierungsverfahren dürfte es schon bald zu ersten kommerziellen Anwendungen in „flash“-Speichern kommen. Bei der Montage von RFID-Tags wird die Selbstorganisation bereits erfolgreich eingesetzt.

Die drei anderen Kristallisationskeime sind eher disziplinorientiert. Sie repräsentieren gewissermaßen die physikalische, chemische bzw. biologische Herangehensweise. Durch diesen Wechsel der Perspektive kommt es zu inhaltlichen Überschneidungen, wodurch sich Synergiepotenziale erschließen lassen. So spielen z. B. Blockcopolymere bei den hybriden Strukturierungsverfahren eine wichtige Rolle, und bei der Montage mesoskopischer Bauelemente werden auch Ansätze diskutiert, die eine biofunktionale Erkennung nutzen.

Nach Ansicht der Autoren bietet eine systematische Schwerpunktsetzung auf Basis der Kristallisationskeime die Chance, die Position Deutschlands auf diesem Feld zu stärken. Mittel- bis langfristig sollte dies zu Produktinnovationen und -verbesserungen sowie überlegenen Verfahrenstechniken führen. Um die anwendungsnahe Umsetzung systematisch und bedarfsgerecht zu unterstützen, plant das BMBF eine Förderbekanntmachung zur kontrollierten Selbstorganisation.

8) Für einen DNA-basierten Prozess zur Kontaktierung und Positionierung von Kohlenstoff-Nanoröhren siehe z. B. K. Keren et al., Science 302, 1580 (2005)

9) C. Mao et al., Science 305, 215 (2004)