

D isziplin im Nano-Maßstab

Selbstorganisation in Bottom-Up-Prozessen



Als in den 60er Jahren die Elektronenröhren im Fernseher und im Radio durch Transistoren abgelöst wurden, übersprang die Technik glatt den Millimetermaßstab. Aus einigen Zentimeter großen Glaskolbenröhren wurden flächige Halbleiterscheiben, auf denen elektrische Leitungen, Transistoren, ja ganze Schaltungen auf die Breite eines Haares von ca. 50 Mikrometern oder den zwanzigsten Teil eines Millimeters passten. Die Mikroelektronik war erfunden. Und die weitere Marschrichtung wurde gleich mitgeliefert: 1965 formulierte Intel-Mitbegründer Gordon Moore die Prognose, dass sich die kleinste geometrische Größe von Bauelementen und Schaltungen alle 18 Monate halbieren werde! Die gewagte Spekulation erfüllte sich, wurde zur Regel, und heute nach fast 30 Jahren Gültigkeit spricht man ehrfurchtsvoll vom *Moore'schen Gesetz*. George Moore selbst nennt es heute *eine sich selbst erfüllende Prophezeiung*. An dieser Erfüllung arbeitet eine ganze Branche: Vom Hersteller der Produktionsanlagen bis zum Computerbauer, und alle erhalten von dieser Prophezeiung eine einzigartig präzise Kalkulationsbasis. Ohne diese Basis stünde der *Return of Investment* für die Milliarden Euro schweren Investitionen in die Fabriken von höchst-integrierten Halbleiterschaltkreisen in den Sternen.

Das Kernstück der Miniaturisierung ist dabei die optische Lithografie – die Technik also, die kleinste Strukturen in Fotolacke abbildet. Für das Jahr 2012 werden für die optische Lithografie mittels *Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL)* Design- und Layoutinformationen mit einer Auflösung von 50 Nanometer in der Produktion vorhergesagt. Aber schon heute werden in mikroelektronischen Schaltungen Milliarden von Bauelementen zu hochkomplexen Systemen ver-

gehen. Alle führenden Mikroelektronikkonzerne dieser Welt fürchten dieses Ende und bangen um ihre Milliarden Investitionen. Gleichzeitig wird heftig in die Forschung investiert, um das Ende nicht zu verschlafen oder gar die Führung in der Schlüsselindustrie Elektronik zu verlieren.

Arbeitsfeld Lithografie

Neue Ansätze greifen das Kernstück der Miniaturisierung an: Die Lithografie. Statt große Strukturen klein zu machen, forderte schon der Nobelpreisträger Heinrich Rohrer: *Bottom-up* statt *Top-down*. Das heißt: Atome und Moleküle sollen zu Nanometer-Strukturen wachsen und elektronische Funktionen von Bauelementen übernehmen. Diese Nanotechnologie kann massiv-parallel und kostengünstig Elemente mit kontrollierter Strukturgröße unterhalb der Auflösungsgrenze der optischen Lithografie bereitstellen. Hierbei gehen jedoch die klassischen Entwurfsverfahren von Design und Layout verloren; die Herausforderung besteht darin, den schmerzlichen Verlust der Designkontrolle durch physikalisch-chemische Methoden der Selbstorganisation zu überwinden.

Die Universität Duisburg-Essen ist in diesem Forschungsfeld hoch engagiert. Die Basis kleinster Strukturen erforscht der Sonderforschungsbereich SFB 445 *Nanopartikel aus der Gasphase: Entstehung, Struktur, Eigenschaften*. Innerhalb des SFB und im Verbund mit mehreren Projekte des von der EU finanzierten Forschungscluster *Nanoscale Information Devices* entwickelt das Duisburger Fachgebiet *Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie* die Anwendung der Nanotechnologie für die Elek-

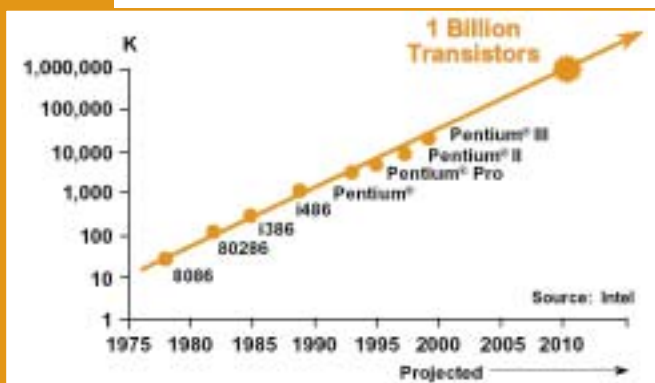
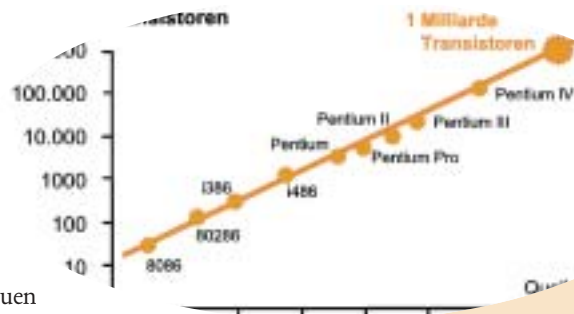


Abbildung 1: Anzahl von Transistoren in Mikroprozessoren der Fa. Intel seit 1977 mit einer Projektion bis 2010. Die Erhöhung der Bauteilanzahl wurde durch stetige Miniaturisierung der geometrischen Daten entsprechend der Moore'schen Regel (durchgezogene Linie) erreicht (nach Daten der Intel Webpräsenz).

knüpft (vgl. Abb. 1). Die Nanoelektronik in Fortführung der Moore'schen Regel ist etablierte Realität, die auf unabsehbare Zeit die Herstellung elektronischer Bauelemente und Schaltungen höchster Komplexität und Dichte beherrschen wird. Dennoch ist eines gewiss: Auf ewig wird es mit der Halbierung der kleinsten Strukturgröße in jeweils 18 Monaten nicht weiter-



tronik. Um überhöhten Erwartungen gleich entgegenzutreten: Ziel ist nicht die Herstellung eines neuen Supercomputers mit höherer Integrationsdichte oder schnellerem Takt, sondern die Auffindung neuartiger physikalischer Wirkprinzipien im Nanometer-Maßstab, die mit der optischen Lithografie nicht erreichbar sind und der Elektronik auch dann ein dynamisches Wachstum sichern, wenn die Dynamik der Miniaturisierung am Ende ist. Die Nanotechnologie für die Elektronik nutzbar zu machen ist der Ausgangspunkt der folgenden Beispiele. Hierbei steht eine Erhöhung der Funktionalität im Vordergrund. Erste Ansätze aus der etablierten ein-dimensionalen Nanoskalierung durch die Epitaxie – das heißt durch das geordnete Wachstum kristalliner Festkörper (zumeist Halbleiter) auf einkristallinem Träger – werden experimentell ausgelotet. Im zweiten Schritt werden Möglichkeiten der Erweiterung in eine dreidimensionale Nanoskalierung unter Einsatz von Nanopartikeln aus der gasförmigen und flüssigen Phase untersucht.

Geordnetes Wachstum

Die Epitaxie ist ein sehr etabliertes und leistungsfähiges Verfahren zur Ausnutzung der Selbstorganisation. In Abbildung 1 wird der Ablauf skizziert. Der Träger wird auf eine Temperatur eingestellt, die zumeist bei 500 bis 700°C liegt. Bei dieser Temperatur haften die durch die Gasphase antransportierten Quellmoleküle auf der Oberfläche. Andererseits bewahren sie sich eine ausreichende Mobilität wie ein tanzender Wassertropfen auf einer heißen Herdplatte. Erst dadurch können die chemischen Bindungskräfte als Mittel der Selbstorganisation wirksam werden. Die Moleküle bewegen sich nämlich auf der Oberfläche bis an eine Atomlagenkante. Dort erhöht sich ihre Haftung und reduziert sich ihre Beweglichkeit, bis sie in einer

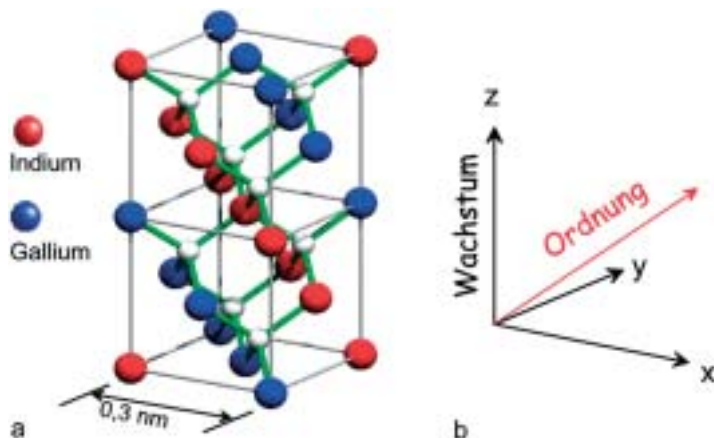


Abbildung 3: Einheitszellen eines (Indium-Gallium-Arsenid) Kristalls in der Struktur der Zinkblende (ZnS) mit einer additiven Ordnung in Form der CuPt_B-Ordnung. Hier wechseln sich im 45° Raumwinkel der Einheitszelle, der (1-11) Richtung, monoatomare Indium- und Gallium-Ebenen ab.

Abbildung 2: Epitaxie oder geordnete Kondensation auf einer aufgeheizten Substratoberfläche: Adhäsion auf der glatten Oberfläche (1) hohe Beweglichkeit bis Erreichen einer Kante (2) Bewegung entlang einer Kante bis zur Endposition in einer Ecke (3).

Ecke ihre endgültige Position finden. Das Ergebnis ist ein sich verbreiterndes Monolagen-Wachstum, bevor in der vertikalen Richtung die nächste Monolage begonnen wird. Je Quadratmillimeter und Sekunde treffen auf den Träger 1000 Milliarden Atome auf, die durch den Selbstorganisationsprozess ihre Position im Kristallverbund auffinden. So entsteht aus dem Chaos ein hochperfekt gezüchteter Kristall. Durch den Einsatz von wechselndem Quellmaterial sind perfekt-kristalline Schichten von wenigen Atomlagen möglich, die allein erst eine technologische Umsetzung der Quantenmechanik ermöglichen.

Die Verfeinerung dieses Selbstorganisationsprozesses liefert viele erfolgversprechende Ansätze für die Nanoelektronik. Ein Beispiel ist die Erzeugung eines zusätzlichen Ordnungsgrades in einem Halbleiterkristall. Hierzu werden Zinkblendekristalle verwendet, die aus zwei Hauptgruppen der Elemente aufgebaut werden. Je Hauptgruppe können mehrere Atome eingesetzt werden, die im Allgemeinen stochastisch im Zinkblendegitter verteilt sind. Unter geeigneten Wachstumsbedingungen mutiert diese Unordnung zu einer Ordnung. In Abbildung 3 ist dieser Prozess für den Mischkristallhalbleiter (Indium-Gallium)-Arsenid gezeigt mit Indium und Gallium als Vertreter der gleichen Hauptgruppe. Im 45° Raumwinkel verkippt zur Wachstumsrichtung bilden sich alternieren Gallium- bzw. Indium-Atomebenen aus und diese Richtungsabhängigkeit überträgt sich in die optoelektronischen Eigenschaften mit dem Ziel die Datenübertragungskapazität einer Lichtwelle zu verdoppeln. Wie in Abbildung 4 gezeigt können die Daten einer sich in z-Richtung ausbreitenden Lichtwelle mittels Intensitätsamplituden in x-

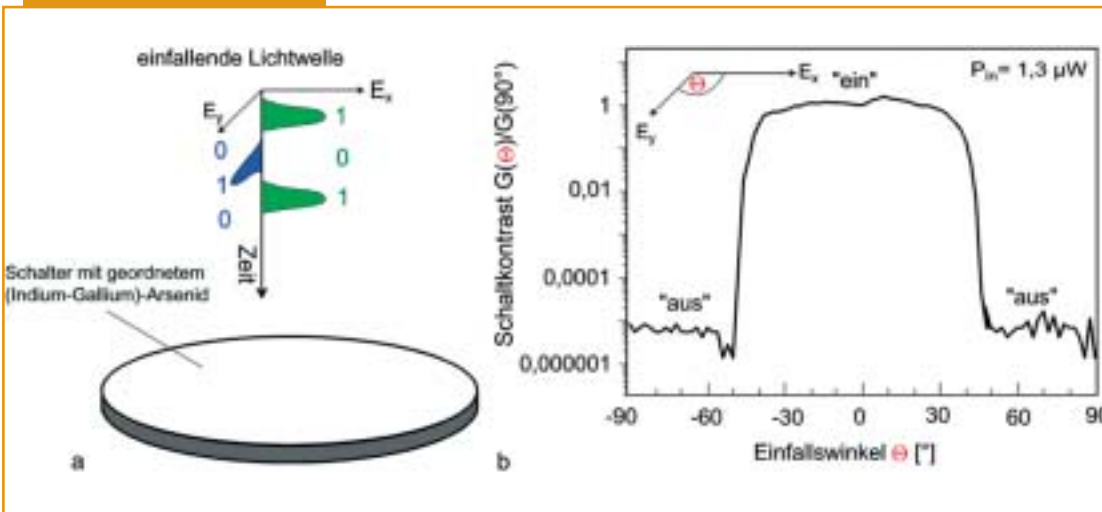


Abbildung 4: (a) Einfall einer Lichtwelle mit Intensitätsamplituden in x- und y-Richtung und. (b) Leitfähigkeitskontrast einer Detektorschaltung als Funktion des Einfallswinkels θ zur Bestimmung einer Amplitude in x-Richtung. Der hochempfindliche Schaltkontrast beträgt mehr als 5 Größenordnungen (in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. G.H. Döhler, Universität Erlangen-Nürnberg).

und Nanoelektronik, wobei der Nanometer-Maßstab nur in der vertikalen Richtung vorliegt und durch das Kristallwachstum vorgegeben wird. Beispiele hierfür sind ultra dünne Schichtsysteme für quantenmechanische Bauelemente. In diesen Bauelementen können Elektronen dünnste Schichten durchtunneln und einen Bereich negativ-differentiellen Widerstandes erzeugen. Dieses physikalische Prinzip wird zum Beispiel zur Vereinfachung von logischen Schaltungen eingesetzt. Oder es werden Quantenbrunnen aus dünnen Schichten gebaut. In diesen Schichten ist



und y-Richtung aufgeprägt werden. In Kooperation mit der Universität Erlangen-Nürnberg wurde eine geeignete Detektionsschaltung aufgebaut, deren Kernstück das geordnete (Indium-Gallium)-Arsenid bildet. Der Kristall ermöglicht die separate Detektion der in x- bzw. y-Richtung kodierten Intensitätsamplituden der Lichtwelle: die Dichte der Daten wurde verdoppelt. Der Schaltkontrast der Intensitätsamplituden in x- oder y-Richtung beträgt mehr als 4 Größenordnungen und empfiehlt sich für Anwendungen in der optischen Datentechnik mit Glasfaserkabeln.

die Bewegung der Elektronen so eingengt, dass die Absorption und Emission von Licht aus diesen Strukturen mit einer definierten Wellenlänge oder Farbe erfolgt, die über die Größe des *Brunnen* einstellbar ist.

Die Nutzung der Selbstorganisation in der Epitaxie setzt eine nachfolgende Strukturierung mit konventionellen Methoden der Lithografie voraus. Diese äußerst leistungsfähige Verfahrenskombination dominiert die derzeitige Mikro-

Damit sich der Einsatz der Selbstorganisation zur Herstellung nanoelektronischer Bauelemente lohnt, müssen Strukturgrößen einstellbar sein, die weit unterhalb der Auflösung der optischen Lithografie liegen. Ein attraktives Verfahren besteht darin, die strukturgebende Größe im Nanometermaßstab aus der Aerosoltechnologie zu beziehen (Abb. 5). Die Spezialisten für diese Technologie sind in der Duisburger Arbeitsgruppe um Prof. Heinz Fißan. Das Ausgangsmaterial wird in einem Rohrofen verdampft und kondensiert im Trägerstrom durch abrupte Ab-

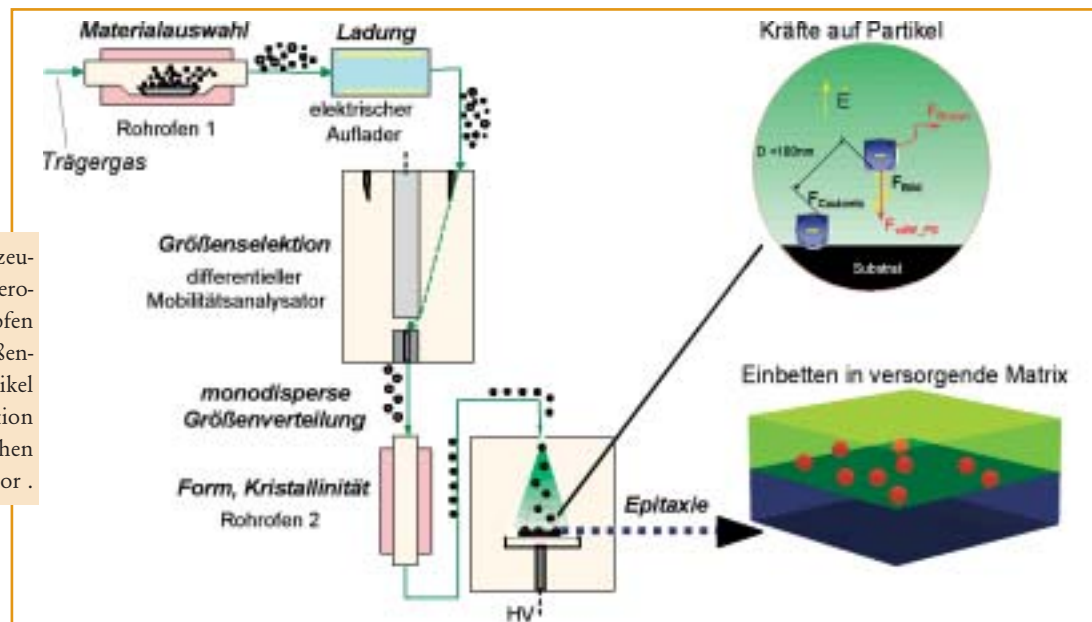


Abbildung 5: Nanopartikelerzeugung mit den Mitteln der Aerosoltechnologie durch Verdampfen in einem Rohrofen und Größenselektion aufgeladener Partikel mit abschließender Deposition in einem elektrostatischen Präzipitator.

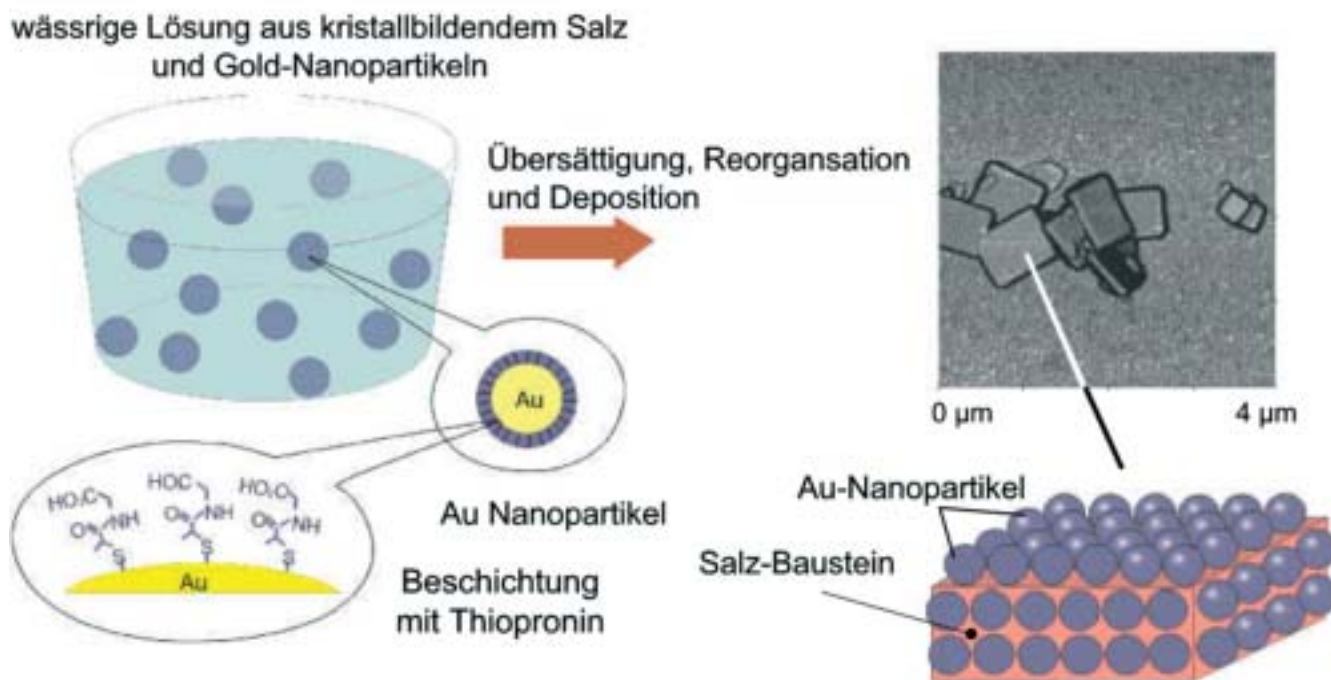


Abbildung 6: Herstellung aus der flüssigen Phase von elektronischen Funktionseinheiten bestehend aus nicht-leitendem anorganischen Salz und einer die Leitfähigkeit bestimmenden Beschichtung mit Nanopartikeln (hier Gold). Die Beschichtung erfolgt gleichzeitig mit der Salzbildung durch Liganden-technologie (in Zusammenarbeit mit Dr. B. Moore, University of Strathclyde)

kühlung zu einem polydispersen Partikelstrom, dessen Größen einen weiten Nanometer-Bereich überstreichen. Die Nanopartikel werden im folgenden Auflader einfach elektrisch aufgeladen und nach Größen sortiert. Durch elektrostatische Anziehung einerseits und größenabhängige Mobilität senkrecht zum Gasstrom andererseits wird selektiv nur *eine* Partikelgröße die innere Elektrode an der Hohlblende erreichen und zur Ablagerung weitergeleitet. Allerdings verhindern die hohen Anziehungskräfte zwischen den Gitterbausteinen und den deponierten Nanopartikeln, die Van-der-Waals-Kräfte, eine Mobilität auf der Oberfläche. Eine Erhöhung der Trägertemperatur wie in der Epitaxie ist leider nicht erfolgversprechend, da die Partikel eher verdampfen oder zerfallen, bevor sie die Van-der-Waals-Haftung überwinden. Im Duisburger Sonderforschungsbereich werden die Aerosol-Nanopartikel nach der Deposition in einem epitaktischen Überwachungsprozess in einen Kristall eingebettet. So werden Quantenbrunnen gebaut, deren Größe und Funktion durch die Aerosoltechnologie eingestellt wird.

Mikroskopische Bauklötze

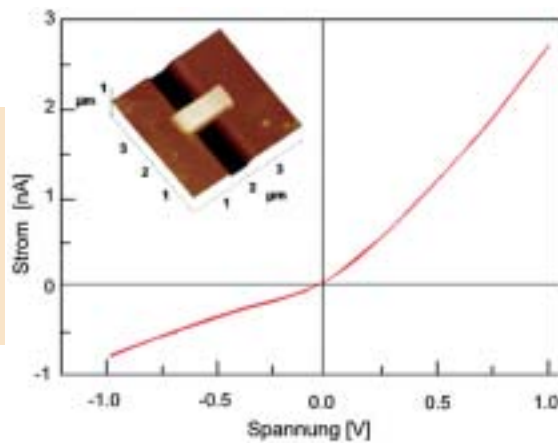
Die bisher skizzierten Techniken verwendeten eine Kombination von Strukturgebung und Materialerzeugung. Zur Verbindung dieser Basistechnologien in einem einzigen selbstorganisierten Prozess können Techniken in der flüssigen

Phase eingesetzt werden, die eine Selbstorganisation aus Übersättigungsmechanismen ableiten. Ein Erfolg versprechender Ansatz ist die Erzeugung von Bausteinen im Nanometer-Maßstab, die aus einem anorganischen Salz als Basismaterial und einer Nanopartikel-Beschichtung bestehen (Abb. 6).

An der Universität Strathclyde werden solche quaderförmige Bausteine, bestehend aus Kaliumsulfat- oder Rubidiumsulfat-Salzen, in einer Größe zwischen 10 nm und 10 µm erstellt. Die Bausteine fallen aus einem Übersättigungsprozess durch Lösemittelaustausch aus. Der Lösung können zusätzlich wasserlösliche Nanopartikel und Schwefel-basierte Moleküle (Thiopronin) zugegeben werden. Diese Moleküle dienen als Liganden und stellen eine Verbindung zwischen Nanopartikel und Nanobaustein her, so dass der Nanobaustein vollständig von Partikeln umhüllt wird. So wird durch das Salz die Größe und Form und durch die Nanopartikel die Leitfähigkeit des Bausteines einstellbar. Die elektrischen Eigenschaften dieser Partikel wurden im mit dem Rasterkraftmikroskop erfolgreich nachgewiesen. Nach der Deposition auf metallischen Elektroden (siehe Abb. 7) konnten Strom-Spannungskennlinien aufgenommen werden und auf einem leitenden Halbleitersubstrat gelang die erste Metall-Halbleiterdiode in dieser Technik. Der nächste Schritt – das selbstkontrollierte Aneinanderbinden zweier unterschiedliche Bau-



Abbildung 7: Strom-Spannungsmessungen an Kaliumsulfat (K_2SO_4) Nanobausteinen mit einer Beschichtung aus Au-Nanopartikeln. Das Inlet zeigt die Messanordnung.



Kontakt

Dr. Werner Prost
Prof. Dr. F.-J. Tegude
 Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie
 Tel. 02 03/3 79-46 07
 Fax: 02 03/3 79-34 00
 prost@hlt.uni-duisburg.de

steine durch Verwendung unterschiedlich geladener Liganden – steht jedoch noch aus.

Disziplin oder Selbstordnung

Durch physikalisch-chemische Selbstorganisationsprozesse können auf der Nanometer-Skala neuartige quantenmechanische Funktionalitäten in das Material eingepägt werden, die durch anschließende laterale Strukturierungen in leistungsfähige Bauelemente umgesetzt werden. Eine Herstellung von elektronischen Bauelementen nur mit den Mitteln der Selbstorganisation steckt jedoch noch in den Kinderschuhen und wird diese vielleicht nie verlassen. Ein ungelöstes Problem ist die individuelle Kontaktierung und die Verbindung von selbstorganisierten Strukturen, deren individuelle Position auf dem Träger nur den Gesetzen der Natur verpflichtet ist und nicht dem Entwurf. Der Schaltungsentwurf mit der Verknüpfung von Milliarden von Bauelementen bleibt damit eine Domäne der Lithografie. Die Zukunft der Nanotechnologie für die Elektronik liegt in der Intelligenz des Materials durch den Zauber des wirklich Kleinen!

THP-Beitrag