

2.05

Herausgeber:

TU Dresden  
Forschungsförderung/Transfer

TechnologieZentrumDresden

BTI Technologieagentur Dresden  
GmbH

GWT Gesellschaft für Wissens-  
und Technologietransfer der  
TU Dresden mbH

## Thema dieser Ausgabe: Nanotechnologie

Dresden: DER Standort  
für Nanotechnologie

> 3 | 4 | 20 | 21

Elektronik auf dem Sprung  
von Mikro zu Nano

> 8 | 13 | 15

Ultradünne Schichten –  
funktional & kostengünstig

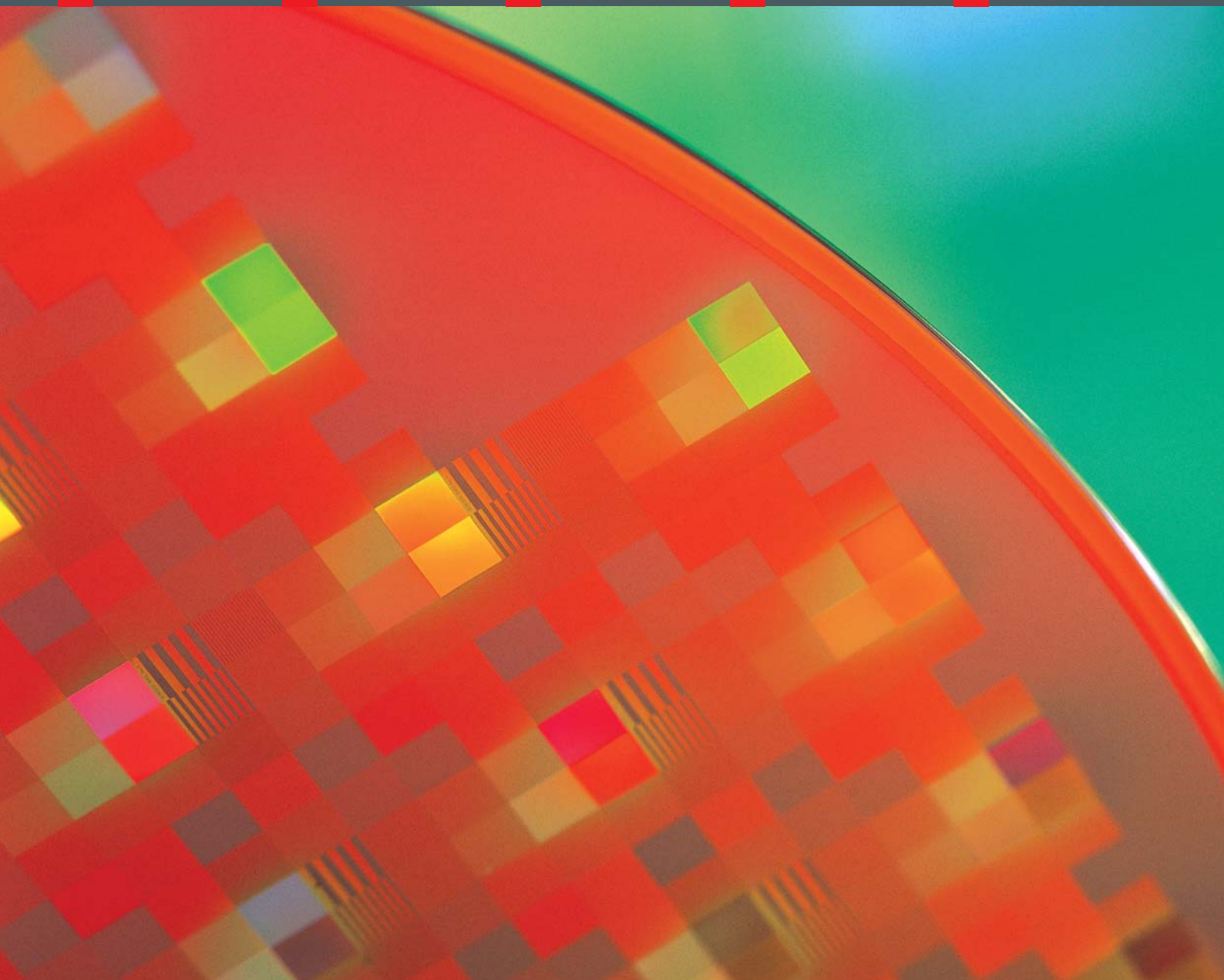
> 5 | 6 | 7 | 16

Neue Eigenschaften  
durch Nanostrukturen

> 9 | 10 | 11  
12 | 22

Optoelektronische und  
optische Anwendungen

> 14 | 17 | 18 | 19





# STADT DER WISSENSCHAFT 2006

Wo Elemente  
sich verbinden.

Mehr Informationen finden Sie  
in der Rubrik »Aktuelles« unter:  
[www.dresden-wissenschaft.de](http://www.dresden-wissenschaft.de)

## Impressum

### Herausgeber:

TU Dresden Forschungsförderung/Transfer  
TechnologieZentrumDresden GmbH  
BTI Technologieagentur Dresden GmbH  
GWT Gesellschaft für Wissens- und  
Technologietransfer der TU Dresden mbH

### Im Internet:

[http://tu-dresden.de/forschung/  
wissens\\_und\\_technologietransfer/  
dresdner\\_transferbrief/transferbrief](http://tu-dresden.de/forschung/wissens_und_technologietransfer/dresdner_transferbrief/transferbrief)

### Redaktion:

Dipl.-Journ. Eva Wricke (TU Dresden)  
[eva.wricke@tu-dresden.de](mailto:eva.wricke@tu-dresden.de)  
Dr. Dietmar Herglotz  
(TechnologieZentrumDresden)  
[herglotz@tzdresden.de](mailto:herglotz@tzdresden.de)  
Ute Kedzierski  
(BTI Technologieagentur Dresden GmbH)  
[kedzierski@bti-dresden.de](mailto:kedzierski@bti-dresden.de)  
André Klopsch (GWT)  
[Andre.Klopsch@GWTonline.de](mailto:Andre.Klopsch@GWTonline.de)

### Entwurf:

Heimrich & Hannot GmbH  
Buchenstraße 12 / 01097 Dresden

### Akquisition / Satz:

progressmedia  
Verlag & Werbeagentur GmbH  
Dr. Helga Uebel, Jörg Fehlich  
Liebigstraße 7 / 01069 Dresden  
Telefon: +49-351-476-67-26  
Fax: +49-351-476-67-39  
E-Mail:  
[joerg.fehlich@top-magazin-dresden.de](mailto:joerg.fehlich@top-magazin-dresden.de)

### Anschrift:

Dresdner Transferbrief  
c/o TechnologieZentrumDresden GmbH  
Gostritzer Straße 61-63  
01217 Dresden  
Telefon: +49-351-871-86-63  
Fax: +49-351-871-87-34  
E-Mail: [herglotz@tzdresden.de](mailto:herglotz@tzdresden.de)

Titelfoto: 300-mm-Wafer  
Quelle:  
Fraunhofer-Gesellschaft / Bernd Müller

Thema der nächsten Ausgabe:  
Innovative Holztechnologien

## „Transfer direct“ informiert über die TU-Forschung

Sie möchten sich über die Forschung an der Technischen Universität Dresden informieren? Kein Problem, die ForschungsCD-Rom „Transfer direct“ weiß Rat.

Multimedial aufbereitet und leicht recherchierbar präsentiert die CD aktuelle Forschungsergebnisse, gibt einen Überblick über Patente, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Diplom- und Promotionsarbeiten. Per Mausclick abrufbar ist die technische Ausstattung der Institute und Professuren. Ganz Eilige finden den gewünschten Ansprechpartner garantiert per Stichwortsuche, per E-Mail ist ein erster Kontakt blitzschnell hergestellt.

Erneut offerieren Unternehmen aus dem In- und Ausland Jobs und Praktika für Studierende und Absolventen.

Online steht die aktuelle ForschungsCD-Rom unter folgender Web-Adresse zur Verfügung:

<http://forschungsinfo.tu-dresden.de/recherche/index.html>

Sie sind interessiert? Dann ordern Sie bitte Ihr kostenloses Exemplar von „Transfer direct“ unter folgender Mailadresse:

[Eva.Wricke@tu-dresden.de](mailto:Eva.Wricke@tu-dresden.de)

Ihre Anfragen auf dem Postweg richten Sie bitte an folgende Anschrift:

**TU Dresden**  
**Forschungsförderung/Transfer**  
**ForschungsCD „Transfer direct“**  
**01062 Dresden**



Ingolf Roßberg  
Oberbürgermeister



Dr. Andreas Leson  
Leiter Nanotechnologie-  
Kompetenzzentrum  
Dresden



#### Grußwort:

## Nanotechnologie in Dresden – Aufbruch in eine neue Dimension

Dresden widmet das Jahr 2005 der Nanotechnologie. Vielleicht fragen Sie sich nun, was sich dahinter verbirgt und was „Nanotechnologie“ mit Dresden zu tun hat?

Ein wichtiger Anwendungsbereich der Nanotechnologie ist die Mikroelektronik. Mit wachsender Leistungsfähigkeit der Computer verringern sich die Strukturen auf den Chips. Bald werden sie nur noch einem Tausendstel eines Haardurchmessers entsprechen. Die in Dresden ansässigen Mikroelektronikunternehmen AMD und Infineon und das neue Fraunhofer-Zentrum für Nanoelektronische Technologien (CNT) arbeiten neben vielen anderen bereits in diesen Strukturgrößen.

Übrigens: Dresden ist heute der modernste Mikroelektronikstandort in Europa!

Die Nanotechnologie eröffnet ein breites Spektrum von Einsatzgebieten. Neue Perspektiven bieten sich auch für kleine und mittlere Unternehmen in den klassischen Branchen wie Maschinenbau, Automobilindustrie und Luft- und Raumfahrt, die in der Region traditionell stark ausgeprägt sind, genauso wie auch für Anwendungen in der Medizin. Der Wissensvorsprung, der hier auf diesem Gebiet aufgebaut wird, verschafft dem Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort Wettbewerbsvorteile bei der Sicherung von Unternehmensstandorten und Ansiedlungen.

Unser Ziel ist es, diese Potenziale gemeinsam gezielt zu erschließen. Die Landeshauptstadt und ihre Partner wollen mit dem „Dresdner Jahr der Nanotechnologie“ den Dialog zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen weiter anregen. Eine Plattform dafür ist das internationale NanotechnologieSymposium „Nanofair“, das 2005 erneut in Dresden stattfinden wird.

Wir wollen die als sehr technikinteressiert bekannten Dresdner Bürger, Jugendlichen und Studenten über diese Zukunftstechnologie und ihre Anwendungsbereiche in Dresden informieren, denn in die Zukunft führt sie nur dann, wenn sich Menschen dafür engagieren und ihre Ausbildung darauf ausrichten. Wir laden Sie herzlich ein, mit uns in diesem Jahr in zahlreichen Veranstaltungen auf Entdeckungsreise durch die Nanowelt zu gehen. ■

Es grüßen Sie herzlich

Ingolf Roßberg  
Oberbürgermeister

Dr. Andreas Leson  
Leiter Nanotechnologie-Kompetenzzentrum  
Dresden



**Kontakt:**  
 Landeshauptstadt Dresden  
 Amt für Wirtschaftsförderung  
 Dr.-Külz-Ring 19  
 01067 Dresden  
 Tel.: +49-351-488 24 39  
 E-Mail: [wirtschaftsfoerderung@dresden.de](mailto:wirtschaftsfoerderung@dresden.de)



Elbsilhouette  
 Foto: DWT/C. Münch

## > Standortvorteile ausbauen, Innovation fördern Nanotechnologie in Dresden



Die Nanotechnologie ist eine der Zukunftstechnologien, für die in der Region Dresden Wachstumspotenziale in besonderem Maße erwartet werden und die ein Schwerpunkt der kommunalen Wirtschaftsförderung ist. Im Raum Dresden gibt es rund 80 Betriebe und etwa 50 wissenschaftliche Einrichtungen, die auf diesem Gebiet tätig sind (deutschlandweit sind es 450 Unternehmen). Mehr als 10 Mrd. Euro wurden hier seit 1994 in Mikroelektronik-Unternehmen und Forschungseinrichtungen investiert, diese bieten Arbeitsplätze für rund 20.000 Menschen. Der Sprung von der Mikro- zur Nanoelektronik ist eine neue große Herausforderung.

Jüngste Investition mit ca. 120 Mio Euro für Gebäude und 170 Mio Euro für Forschungsprojekte in den nächsten 5 Jahren ist das Forschungszentrum für Nanoelektronische Technologien (CNT) – ein Gemeinschaftsprojekt von Infineon Technologies, AMD, der Fraunhofer-Gesellschaft und des Freistaates Sachsen, das am 31. Mai 2005 eröffnet wurde. Qualifizierte Arbeitskräfte und die räumliche Nähe der Fabriken und Konzentration von Forschungseinrichtungen sowie die Verzahnung von Forschung und Fertigung, sind das große Plus von Dresden. Auf dem Dresdner Infineon Gelände sollen etwa 100 Forscher an den winzigen Strukturen im Bereich von 60 Nanometern und auch darunter (40-30 nm) arbeiten.

Wissenschaftler aus der ganzen Welt zieht es nach Dresden, denn hier stehen Großgeräte zur Verfügung, die für internationale Forschungs Kooperationen weltweit einzigartige Experimentiermöglichkeiten bieten, unter anderem im Forschungszentrum Rossendorf (FZR). Dazu gehören zum Beispiel der Freie Elektronenlaser, der Forschungsarbeiten an Halbleiterstrukturen auf der Nanometerskala ermöglicht, oder die hochintensive Positronenquelle für die Materialforschung.

Höhepunkt des Dresdner Jahres zur Nanotechnologie 2005 wird im November zum 4. Male die jährlich stattfindende Nanofair sein, ein internationales Symposium, zu dem über 400 Teilnehmer aus der ganzen Welt im Internationalen Congress Center Dresden erwartet werden.

51 Unternehmen, 10 Hochschulinstitute, 22 Forschungseinrichtungen und 5 Verbände haben ihr Know-how gebündelt und sich zu einem Netzwerk zusammengeschlossen, das als Nanotechnologie-Kompetenzzentrum „Ultradünne funktionale Schichten“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird. Die Koordination dieses bundesweiten Netzwerkes liegt beim Fraunhofer IWS Dresden ([www.nanotechnology.de](http://www.nanotechnology.de)).

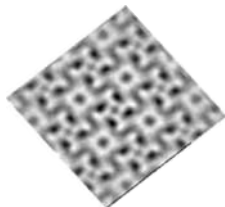
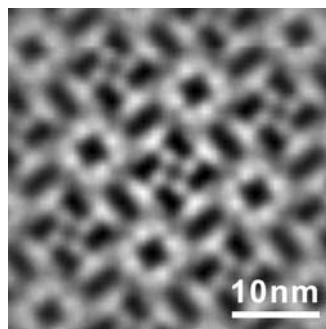
Eine Studie „Potenzialanalyse für den Bereich Nanotechnologie in der Region Dresden/Sachsen“ im Auftrag der Wirtschaftsförderung der Landeshauptstadt Dresden hat zum Ziel, eine realistische Einschätzung des Status quo und der zukünftigen Möglichkeiten der Region zu erarbeiten. Wichtige Instrumente dafür sind eine Befragung der Unternehmen und Forschungseinrichtungen, Expertengespräche und Branchenworkshops. Mit den Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, um zu zeigen, welche Kräfte mobilisiert werden müssen, um ein „Nanotechnologie-Cluster Dresden“ mit europäischer Ausstrahlung zu entwickeln. Auftragnehmer ist ein Team, dem namhafte Experten der „Zukünftige Technologie Consulting“ von der VDI Technologiezentrum GmbH sowie der Nano&Micro Technology Consulting angehören. Das Ergebnis soll im Oktober 2005 vorliegen.

Weitere Informationen zu Nanotechnologie-Projekten in Dresden, Veranstaltungstipps sowie weiterführende Links zum Thema finden Sie unter: [www.dresden.de/nano](http://www.dresden.de/nano)



Flyer zum Jahr der  
 Nanotechnologie in Dresden

Ob Brennstoffzelle oder Dieselfilter: Die Nachfrage an Katalysatorsystemen auf Basis von Edelmetallen scheint durch den serienmäßigen Einsatz zur Abgasreinigung in Kraftfahrzeugen noch lange nicht ihren Höhepunkt erreicht zu haben. Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik ist daher in absehbarer Zeit mit einer dramatischen Verknappung der Edelmetallressourcen zu rechnen. Mit biologischen Unterlagen, sogenannten Biotemplaten, kann der Herstellungsprozess von katalytisch aktiven Oberflächen mit einem deutlich geringeren Bedarf dieser teuren Ressourcen erreicht werden.



**Kontakt:**  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Maschinenwesen  
Institut für Werkstoffwissenschaft  
01062 Dresden  
Prof. Dr. Wolfgang Pompe  
E-Mail:  
pompe@tmfs.mpgfk.tu-dresden.de

Technische Universität Dresden  
Fachrichtung Biologie  
Institut für Genetik  
01062 Dresden  
Prof. Dr. Gerhard Rödel  
E-Mail:  
Gerhard.Roedel@mailbox.tu-dresden.de

**Kooperationspartner:**  
Namos GmbH  
Windbergstraße 54  
01728 Bannewitz  
Dr. Jürgen Hofinger  
E-Mail:  
juergen.hofinger@namos.de

Innovation durch Kooperation

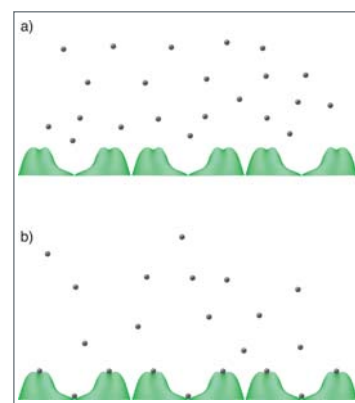
## Sparsam und wirkungsvoll: Synthese von Edelmetallkatalysatoren in bakteriellen Proteinmembranen

Das Potenzial dazu ist vorhanden: Herkömmliche Technologien zur Beschichtung von Trägerstrukturen nutzen nur einen geringen Teil des eingesetzten Edelmetalls für den katalytischen Prozess. Eine Verbesserung erfordert einen kontrollierten Eingriff in das Design der Oberflächen auf der Nanometerskala. Dazu gehören Eigenschaften wie Struktur und Zusammensetzung der aktiven Metallcluster, aber nicht zuletzt auch deren Größe, Verteilung und Zugänglichkeit. Genau hier können biologische Template einen entscheidenden Beitrag liefern: Als nanostrukturierte „Unterlage“ der Edelmetallcluster können sie über Keimbildung und Keimwachstum eine bevorzugte Entstehung von homogen verteilten „nützlichen“, d. h. katalytisch besonders aktiven Clustern bewirken. Bei geeigneter Prozessführung kann damit gleichzeitig die Entstehung unwirksamer Edelmetallcluster verhindert werden.

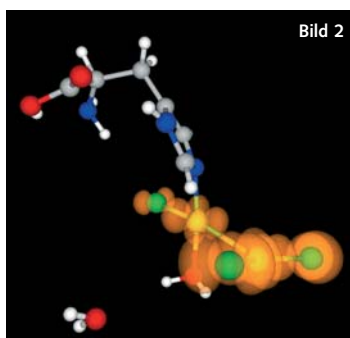
In gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Instituts für Werkstoffwissenschaft und des Instituts für Genetik der Technischen Universität Dresden sowie der Namos GmbH in Bannewitz konnte in den letzten Jahren mit der Erzeugung von Edelmetallclustern auf bakteriellen Proteinmembranen, den sogenannten S-Layern (surface layer protein), eine attraktive Lösung hierfür entwickelt werden. Zahlreiche Bakterien bilden in ihren Zellwänden periodische Proteinmembranen aus (Bild 1). In ihnen sind Nanoporen mit speziesabhängiger Kristallsymmetrie in großer Regelmäßigkeit angeordnet. Der Abstand benachbarter gleicher morphologischer Einheiten beträgt je nach Art 5 bis 30 Nanometer. Da die Struktureinheiten aus identischen Proteinen oder Glycoproteinen aufgebaut sind, weisen sie eine präzise räum-

liche Modulation der physikalisch-chemischen Oberflächeneigenschaften auf. Das macht sie zu einem idealen Objekt für den Aufbau von artifiziellen supramolekularen Strukturen. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass auf ihnen regelmäßig angeordnete nanometergroße Metallclusteranordnungen erzeugt werden können. Die Fähigkeit zur Selbstorganisation der Monomere erlaubt es, die zweidimensionalen Proteinanordnungen an der Wasser-Luft-Grenzfläche sowie bei geeigneter Prozessführung auch auf Festkörperoberflächen als großflächige Proteinmembranen zu rekonstituieren. Damit ist es möglich, mit Hilfe der S-Layer auf Oberflächen von Katalysatorträgern oder Sensoren metallische Nanostrukturen definiert abzuscheiden (Bild 2, Bild 3).

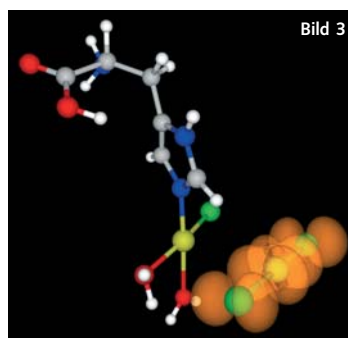
Gegenwärtig wird das Potenzial der Erzeugung von Edelmetallclustern auf bakteriellen Proteinmembranen von den drei Dresdner Einrichtungen in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für physikalische Chemie der TU Bergakademie Freiberg weiter ausgelotet. Zugleich liegen bereits fundierte Aussagen zu der zu erwartenden Kostenreduktion bei einem Up-scaling des Herstellungsprozesses vor. Die Firma Namos GmbH bietet interessierten Kunden bereits jetzt S-Layer-Proteine für das Biotemplating an.



**Bild 1:** Palladiumcluster, abgeschieden auf einem S-Layer von *Bacillus sphaericus*; a) Bildrekonstruktion des nicht beschichteten S-Layers (elektronenmikroskopische Aufnahme); b) Bildrekonstruktion des mit Pd-Clustern beschichteten S-Layers; die etwa 2 nm großen Cluster (dunkle Bildelemente) sitzen genau an den Orten der S-Layer-Poren (dunkle Bildelemente in Bild a).



**Bild 2**



**Bild 3**

**Bild 2:** Prinzip der Bildung erster Keime auf dem Biotemplat: Metallsalzagglomeratekomplexe binden regelmäßig an definierten Stellen des S-Layers.

**Bild 3:** Der Mechanismus der periodischen Anbindung von Keimen: Molekulardynamische Simulation der Bildung eines Platin-Dimers an einem Histidin-Liganden des S-Layers.

Kontakt:  
Technische Universität Dresden  
Fachrichtung Physik  
Institut für Angewandte Photophysik  
Professur für Optoelektronik  
01062 Dresden

Prof. Karl Leo  
Dr. Martin Pfeiffer  
Tel.: +49-351-46337559  
E-Mail: k.leo@physik.tu-dresden.de  
E-Mail: pfeiffer@iapp.de

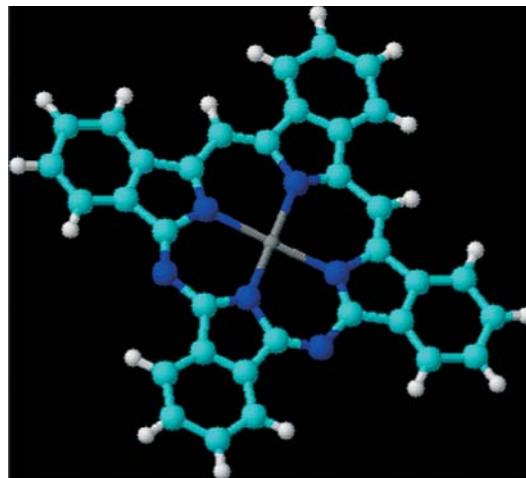
Solarzellen aus organischen Aufdampfschichten sind aufgrund der günstigen Absorptionseigenschaften organischer Farbstoffe, der geringen Prozesstemperaturen und dem geringen Material- und Energiebedarf bei der Herstellung eine viel versprechende Alternative zur herkömmlichen Silizium-Technologie. Am Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) der TU Dresden wird daran gearbeitet, erfolgreiche Konzepte aus dem Bereich organischer Leuchtdioden (OLED) wie die in Dresden entwickelte Technologie der kontrollierten p- und n-Dotierung auf organische Solarzellen zu übertragen. Ein Durchbruch zu ersten konkurrenzfähigen Zellen auf flexiblen Foliensubstraten erscheint in den nächsten Jahren möglich.




TU-Wissenschaftler arbeiten an ...

## ... kostengünstigen Solarzellen aus organischen Aufdampfschichten

Bei der Nutzung von Sonnenenergie unterscheidet man zwischen Solarkollektoren, welche die Strahlung der Sonne in thermische Energie, z.B. zur Raumheizung oder Warmwasserbereitung nutzen, und Solarzellen, welche über den photovoltaischen Effekt in Halbleitermaterialien die Sonneneinstrahlung direkt in elektrische Energie umsetzen.

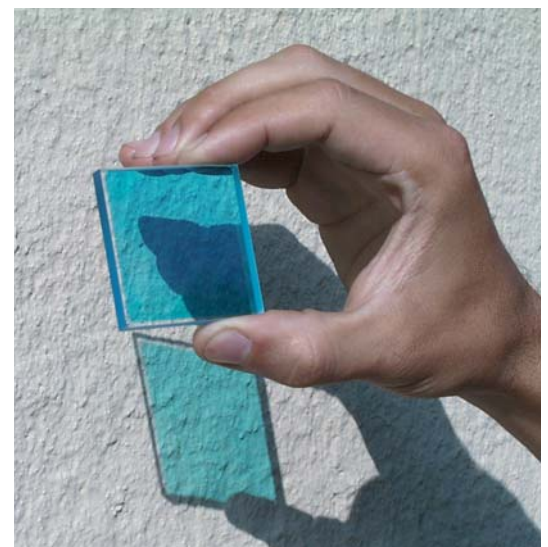



 Chemische Struktur von Zink-Phthalocyanin, einem typischen Absorbermaterial für organische Solarzellen; hellblau=Kohlenstoff, dunkelblau=Stickstoff, weiß=Wasserstoff, grau=Zink.

Der weltweite Markt für Solarzellen zeigt seit Jahren ununterbrochen zweistellige Wachstumsraten. Die treibende Kraft für das stetige Wachstum sind dabei einerseits große Zukunftsvisionen von großflächigen Solaranlagen, sei es nun in Wüstengebieten oder verteilt auf Millionen Hausdächer – die es ermöglichen, die Energieversorgung zusammen mit anderen regenerativen Quellen wie Wind- und Wasserkraft und Biomassenutzung zunehmend unabhängig von fossilen Ressourcen sicherzustellen. Andererseits bietet sich eine Fülle von Anwendungen an, für die Solarzellen bereits heute die kostengünstigste Form der Energiebereitstellung sind. Dazu gehören die Versorgung von Berghütten und abgelegenen Siedlungen (z.B. in Entwicklungsländern), Anwendungen im Campingbereich, dezentrale Funkstationen, Beleuchtung von Wegweisern


oder Bushaltestellen, Gartenleuchten, Parkuhren, Anwendungen im Spielzeugsbereich und mobile Kleinanwendungen wie Taschenrechner und Armbanduhren.

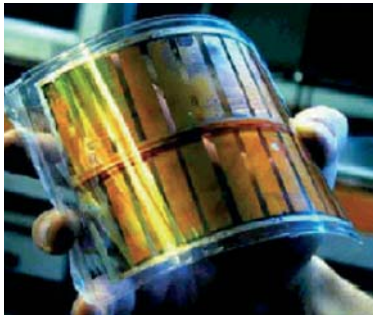
Das größte Hindernis für eine noch höhere Marktdurchdringung ist dabei der Preis für die derzeit dominierende kristalline Siliziumtechnologie. Als Alternative bieten sich neben amorphem Silizium und Verbindungshalbleitern wie Cadmium-Tellurid oder Kupfer-Indium-Diselenid organische Halbleitermaterialien an. Es handelt sich dabei um mehr oder weniger komplexe organische Kohlenwasserstoff-Verbindungen, die sich im Wesentlichen aus Benzolringen aufbauen. Ein typischer Vertreter ist das Phthalocyanin, welches in seiner chemischen Struktur eng mit Chlorophyll (Blattgrün) verwandt ist. Es zeichnet sich durch eine extrem starke Lichtabsorption aus, d.h. die Lichteindringtiefe beträgt am Absorptionsmaximum nur ca. 50 nm (1/20 000 mm). Entsprechend können die photoaktiven Schichten von organischen Solarzellen




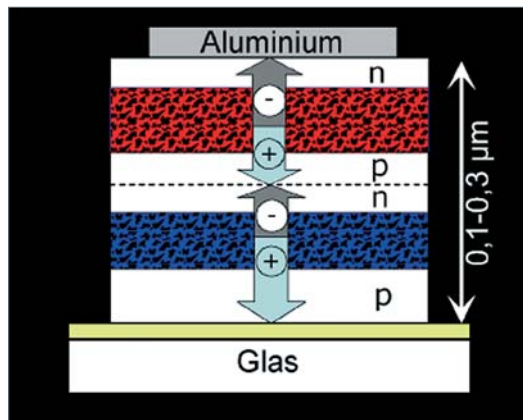
 Abb. rechts: Aufdampfschicht aus Zink-Phthalocyanin auf Glas. Die Dicke von 30 nm entspricht ca. 100 Moleküllagen.



 Prototyp einer organischen Polymersolarzelle auf flexiblem Foliensubstrat (Quelle: Universität Linz)



 Struktur einer organischen p-i-n Tandem-Solarzelle. Verschiedene Absorberschichten werden zwischen transparente p- und n-dotierte Schichten eingebettet. Die Photospannungen der einzelnen p-i-n Zellen addieren sich.



Kontakt:  
 Technische Universität Dresden  
 Fachrichtung Physik  
 Institut für Angewandte Photophysik  
 Professur für Optoelektronik  
 01062 Dresden

Prof. Karl Leo  
 Dr. Martin Pfeiffer  
 Tel.: +49-351-46337559  
 E-Mail: k.leo@physik.tu-dresden.de  
 E-Mail: pfeiffer@iapp.de

um einen Faktor 1000 dünner sein als für typische Siliziumsolarzellen. Durch die relativ geringen Prozesstemperaturen (Schichtabscheidung im Vakuum mit Verdampferquellen zwischen 200 und 450 °C auf Substrate mit Temperaturen zwischen 20 und 150 °C) ergibt sich die Perspektive mit extrem geringem Material- und Energieaufwand kostengünstige Solarzellen auf flexiblen Substraten wie Metall- oder Kunststoff-Folie herzustellen.

Organische Halbleiter haben in den letzten Jahren anorganische Halbleiter als photoaktive Materialien in Photokopierern fast vollständig verdrängt. Flachdisplays auf Grundlage organischer Leuchtdioden (OLED) werden gerade in den Markt eingeführt und erreichen hohe Effizienzen und faszinierende Qualität. Auch die Entwicklung organischer Solarzellen schreitet voran und kann zunehmend von der rasanten Entwicklung in den anderen genannten Gebieten profitieren. So hat das Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) der TU Dresden in den vergangenen Jahren mit der Technologie gezielter p- und n-Dotierung organischer Halbleiter einen entscheidenden Beitrag zur Effizienzsteigerung organischer Leuchtdioden geleistet. Die ausgegründete Firma Novald GmbH, Dresden, beschäftigt inzwischen über 40 Mitarbeiter und kooperiert mit weltweit führenden Displayherstellern. Am IAPP wurde jetzt gezeigt, dass p- und n-dotierte organische Schichten aus transparenten Materialien mit großer Bandlücke auch eine optimale Umgebung für die photoaktive Schicht in organischen Solarzellen darstellen. Die daraus resultierenden Solarzellen mit p-i-n-Architektur erreichen hohe interne Quantenausbeuten bis zu 80 % und lassen sich problemlos zu so genannten Tandemzellen stapeln. Dies ermöglicht es, Solarzellen mit unterschiedlichen aktiven Materialien, z.B. ein blaues und ein rotes Material, miteinander zu kombinieren und so das komplette Sonnenspektrum zu nutzen.

Das IAPP hat mit den p-i-n-Tandemzellen eine universell einsetzbare Architektur für organische Solarzellen geschaffen und zum Patent angemeldet. Unter Verwendung von aus der Literatur bekannten organischen photoaktiven Schichten (Mischschichten aus Phthalocyanin und dem Fulleren  $C_{60}$ ) wurde ein energetischer Wirkungsgrad von knapp 4 % erreicht. Die Schwelle für erste Anwendungen liegt aber bei ca. 7 %. Deswegen konzentriert sich die Entwicklung am IAPP in enger Zusammenarbeit mit einer führenden Gruppe auf dem Gebiet der Oligomersynthese (Prof. Peter Bäuerle, Universität Ulm) jetzt auf die Optimierung der photoaktiven Schichten. Erste Erfolg versprechende Ergebnisse liegen schon vor. So ist es gelungen, die Photospannung einer einzelnen Solarzelle von 0.5 V auf 0.9 V zu steigern. Parallel wird z.B. am Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) in Dresden an der Technologie zur großflächigen Inline-Abscheidung organischer Materialien gearbeitet. Eine homogene Abscheidung auf  $30 \times 40 \text{ cm}^2 \leq$  große Substrate mit hohen Taktraten wurde erfolgreich demonstriert. Im Zuge des harten Konkurrenzkampfes zwischen Flachdisplays auf LCD-Basis mit OLED-Displays ist damit zu rechnen, dass in naher Zukunft noch deutlich größere Beschichtungsanlagen für organische Materialien entwickelt werden.

Der Durchbruch in den Bereich kommerzieller Nutzbarkeit scheint also in den nächsten Jahren möglich. Bei anhaltend steigenden Ölpreisen und sich verschärfenden Klimaproblemen ist das Marktpotential für solche kostengünstigen Solarzellen nahezu unbegrenzt, selbst wenn sie die Wirkungsgrade von Siliziumzellen nie ganz erreichen. ■

Kontakt:  
TU Dresden  
Fakultät Elektrotechnik  
und Informationstechnik  
Institut für Halbleiter-  
und Mikrosystemtechnik  
Prof. Dr. Johann W. Bartha  
Tel.: +49-0351-463 36413  
Fax: +49-0351-463 37172  
E-Mail: bartha@ihm.et.tu-dresden.de  
www.ihm.tu-dresden.de/



Abb. 3

Seit einigen Jahren hat in der Mikroelektronik eine breite Suche und ein Austausch von Werkstoffen und Technologien begonnen. Die Substitution von Al-Leiterbahnen durch Kupfer war ein erster sehr deutlicher Schritt. Neue Abscheide- und Strukturierungstechniken müssen entwickelt werden, um noch kleinere als 65 nm Strukturen und noch höhere als 5 GHz Schaltfrequenzen zu erreichen. Nicht nur die Basisbreite der Transistoren muss sich bis zur kleinstmöglichen Größe verändern, sondern auch die Abmessung der Chipverdrahtung wird bald unter 50 nm liegen. Den hier erforderlichen Diffusionsbarrieren werden nur noch wenige Atomlagen zugestanden, während die funktionalen Anforderungen sogar steigen. Diese Entwicklung in der Mikroelektronik stimuliert auch die Entwicklung und den Einsatz von Nanotechnologien in anderen Bereichen, so z.B. in der Mikrosystemtechnik, der Sensortechnik und im medizin-technischen Bereich.

Aus dem Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik:

## Ultradünne funktionale Schichten für die Mikroelektronik und andere Anwendungen

Die Entwicklung von zuverlässigen und ultradünnen Diffusionsbarrieren und Kontaktschichten in hochintegrierten Halbleiterbauelementen ist eine sehr wichtige Aufgabe, um die Leistungsfähigkeit von Chips zu erhöhen. Da sich die Dicke solcher Dünnschichten immer mehr in den atomaren Bereich verschiebt, besteht die Notwendigkeit, die Schichten in immer höherer Qualität herzustellen. Jeder Schichtdefekt muss vermieden werden. Darüber hinaus ist die zu beschichtende Oberfläche hinsichtlich ihrer Geometrie und ihrer Zusammensetzung sehr komplex. Für Kontaktlöcher z.B. ist eine möglichst konforme Abscheidung an den Wänden erforderlich, jedoch sollte der Kontaktlochboden frei bleiben.

Diffusionsbarrieren werden z.Zt. in Kupfer-Metallisierungssystemen genutzt. Grundsätzlich haben diese Schichten ein polykristallines Mikrogefüge. Die vorhandenen Korngrenzen bilden sog. Kurzschlusskanäle für die Diffusion von Fremdatomen. In Verbindung mit hohen intrinsischen Schichtspannungen sinkt dadurch die Barriestabilität drastisch; um so mehr je dünner die Diffusionsbarrieren sein müssen. Die Verwendung von nanokristallinen bzw. amorphen Werkstoffen ist ein möglicher Weg für eine Verbesserung der Situation. Ternäre TaSiN- oder TiSiN-Schichten wären zu favorisieren. Solche Schichten sind amorph bereits nach der Herstellung und zeigen auch bei hohen Temperaturen (bis ca. 900 °C in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt) eine hohe Stabilität der Mikrostruktur. Darüber hinaus können TaSiN-Schichten nahezu stressfrei abgeschieden werden, was insbesondere auch einer Anwendung in mikromechanischen Systemen sehr entgegen kommt. Die hohe chemische Stabilität führt weiterhin zu potentiellen Anwendungsmöglichkeiten in mikrofluidischen Systemen oder auch als Schutzschicht gegenüber Feuchtigkeit oder anderen Umwelteinflüssen. Mit dem Austausch von Stickstoff durch Sauerstoff kann ein zuverlässiger Isolator mit einer Durchschlagsspannung von ca. 7 MV/cm erzeugt werden. Eine Doppelschicht aus TaSiN und TaSiO kann als sehr gut isolierende und transparente Schutzschicht gegenüber Feuchtigkeit dienen. Durch Verringerung der Dicke der Doppelschicht auf wenige hundert Nanometer ist auch die Verwendung auf flexiblen Substraten möglich. Die hohe optische Transparenz von TaSiO im Bereich zwischen 350 und 1000 nm bietet eine Anwendung für flexible Solarzellen an. ■

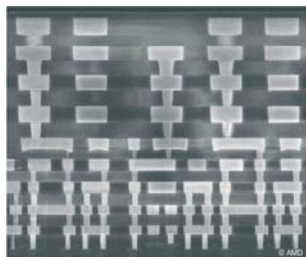


Abb. 1

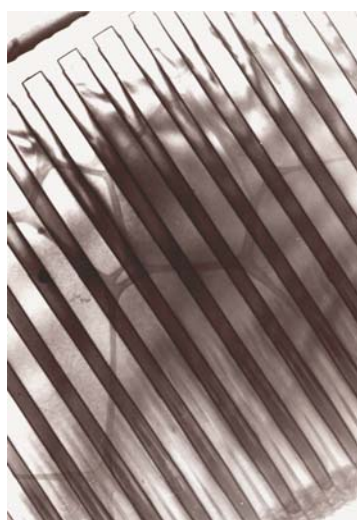


Abb. 2

Diese beiden Forderungen stimulieren jetzt und künftig die Suche nach alternativen Werkstoffen und Abscheidetechniken. Bis heute werden modifizierte Sputtertechniken genutzt, um die Barrierschichten und die Kupferkeimschicht für die nachfolgende galvanische Kupferabscheidung herzustellen. Die Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition ALD) ist wegen ihrer sehr guten strukturkonformen Abscheidung ein heißer Kandidat, um diese Sputtertechniken künftig zu substituieren. Für Kontaktlöcher mit einem Aspektverhältnis ( $AR > 4$ ) oder für Kontaktschichten in tiefen Grabenstrukturen ( $AR > 20$ ) ist der Nachteil der modifizierten Sputtertechniken sehr deutlich.

Alternative Techniken wie z.B. das Vakuumbogenverdampfen, insbesondere die HCA Technik (High Current Arc), könnten die Anwendung von PVD-Verfahren für die künftige Fertigung von Halbleiterbauelementen fortsetzen.

Neben der Suche nach qualifizierten Beschichtungs-techniken wird auch die Auswahl des geeigneten Barrierewerkstoffes immer wichtiger. Ta bzw. TaN



Nano- und Biotechnologie sind z.Z. national und international in aller Munde, weil noch kleinere Dimensionen Perspektiven für neue technische Anwendungen, u.a. in der Mikroelektronik, der Mikrosystemtechnik, der Biomedizin und der Beschichtungstechnologie, versprechen.

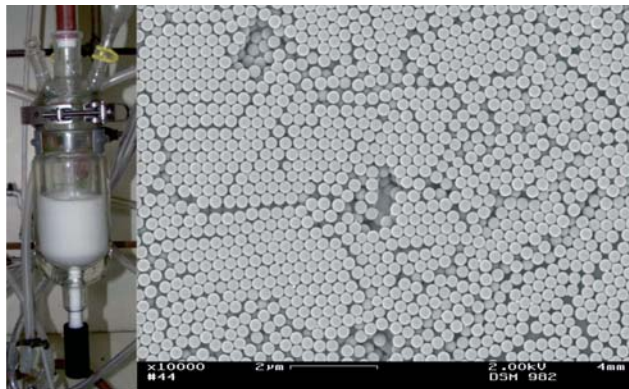


Abb. 1:  
Monodisperse Dispersion

**Kontakt:**  
Technische Universität Dresden  
Fakultät für Mathematik  
und Naturwissenschaften  
Fachbereich Chemie  
und Lebensmittelchemie  
Institut für Makromolekulare Chemie  
und Textilchemie  
Prof. Dr. rer. nat. habil.  
Hans-Jürgen P. Adler  
Dr. Andrij Pich  
Tel.: +49-351-463-33782 /-37676  
Fax: +49-351-37122  
E-Mail:  
Hans-Juergen.Adler@chemie.tu-dresden.de  
Andrij.Pich@chemie.tu-dresden.de  
[www.chm.tu-dresden.de/mtc/](http://www.chm.tu-dresden.de/mtc/)

Mitglied des MFD  
SFB 287 „Reaktive Polymere“

## An der TU Dresden im SFB „Reaktive Polymere“ entwickelt: **Polymerartikel – Eine runde Sache**

Polymerartikel verschiedenster Art und Größen von einigen Nano- bis zu Mikrometern im Durchmesser können relativ einfach hergestellt werden und verbinden im umweltfreundlichen Medium Wasser teils hohe Molekulargewichte mit Funktionalitäten für unterschiedlichste Anwendungen.

Die Herstellung von Polymerdispersionen nach verschiedenen Technologien, wie z.B. der Emulsionspolymerisation, gehört zum Stand der Technik (Abb.1). Sie bilden je nach Art und Weise ihrer Stabilisierung die Basis für alle wasserverdünnbaren Beschichtungssysteme von den Bautenfarben bis zu hochwertigen umweltfreundlichen Industrielacken und sind auch in vielen anderen Anwendungen, wie in der Kosmetik, in Klebstoffen, in der Medizin, in der Mikrosystemtechnik und auch in der Lebensmittelindustrie, wiederzufinden.

Im DFG- Sonderforschungsbereich 287 „Reaktive Polymere“ werden seit 1996 neue Polymerarchitekturen synthetisiert und deren physikalische Strukturen analysiert, um diese in kleinsten Dimensionen auf Oberflächen oder in Mischungen mit anderen Materialien nutzen zu können.

Eines dieser Projekte beschäftigt sich mit der Herstellung sogenannter reaktiver Polymerartikel, deren Größen von einigen Nano- bis zu einigen Mikrometern je nach Ziel und Prozess variierbar sind.

Neue Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Modifizierung von Polymerpartikeln im Sinne ihrer Funktionalität und Morphologie. Mit peroxidischen Oberflächengruppen konnten in reaktiven Mischungen mit anderen Dispersionen mechanisch verstärkte Filme hergestellt werden. Durch Gefriertrocknung entstanden reaktive Pulver für die Einmischung in Polymerschmelzen zur Eigenschaftsmodifizierung von polymeren Werkstoffen. Es sind auch Anwen-

dungen als biomedizinische Immunoassays entstanden. Partikel mit Phosphorsäuregruppen sind erfolgreich im Korrosionsschutz.

Neue Arbeiten sind auf die Herstellung von Hybridmaterialien mit neuen Funktionen orientiert. Es konnten Polypyrrol-, Magnetit-, Zinksulfid- oder auch Gold- und Silbernanocluster auf die Oberfläche haftfest aufgebracht werden. Polypyrrol-Partikel (Abb. 2) sind interessant für den Korrosionsschutz, aber aufgrund ihrer Biokompatibilität auch für biomedizinische Anwendungen. Mit Magnetit-Nanoteilchen im Inneren oder auf der äußeren Schale der Polymerartikel können diese magnetisch vom Rest der Dispersion abgeschieden werden. Erste Ergebnisse liegen mit immobilisierten Enzymen zur Reinigung von farbigen Textilveredlungsabwässern vor.

Neu ist die in-situ-Bildung von Zinksulfid- oder Goldclustern unter Einwirkung von Ultraschall auf Polymerpartikeln, die u.a. als Katalysatoren interessant sein können. Wir können ideal runde und gleich große Nanoteilchen herstellen (Abb.1), aber auch viele andere Formen, wie himbeerähnliche oder sogar nadelförmige (Abb.2/2). Größe und Form der Partikel, Funktionalität des inneren Kerns und der äußeren Schale, deren Dicke und Masseverhältnisse können in vielfacher Weise variiert werden, so dass sie an die gewünschten Eigenschaften entsprechend der Aufgabe angepasst werden können.

Wenn auch die Partikel nicht immer rund sind, aber eine runde Sache im übertragenen Sinne kann damit erzeugt werden!

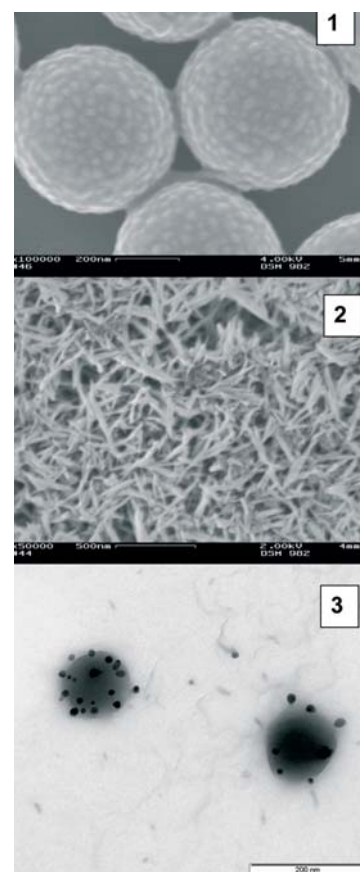


Abb. 2. Komposit-Partikel:  
1) Polymerartikel mit Polypyrrolclustern  
2) Nadelförmige Hybridpartikel mit Polypyrrol  
3) Hybrid -Mikrogele mit Silberclustern



**Fraunhofer** Institut  
Fertigungstechnik  
Materialforschung

Kontakt:  
Fraunhofer IFAM Dresden  
Dr.-Ing. Thomas Weißgärber  
Tel.: +49-351-2537 305  
Fax: +49-351-2537 399  
E-Mail:  
Thomas.Weissgaerber@  
epw.ifam.fraunhofer.de  
www.epw.ifam.fraunhofer.de



Abb. 1:

Nanopulvermetallurgie am IFAM Dresden

## Nanokristalline Werkstoffe und Nanokomposite für funktionelle Anwendungen



Abb. 2:  
Leistungselektronisches Testmodul  
(Bodenplatte gefertigt aus einem  
metallischen Verbundwerkstoff)

Der Begriff Nanotechnologie gehört inzwischen weltweit zum allgemeinen Sprachgebrauch und scheint sich durch alle Zweige der Wissenschaften und der Technik zu ziehen. Spricht man von Nanopulvermetallurgie, so ordnet sich dieser Begriff in die Oberkategorie Nanotechnologie ein. Die Verbindung von Nanotechnologie und Pulvermetallurgie ergibt sich, wenn man die sonst üblichen Dimensionen von Mikrometern in den Bereich von Nanometern bewegt. Unter Nanopulvermetallurgie soll also die Erzeugung von Nanopulvern und deren Verarbeitung sowie die Einstellung nanokristalliner Strukturen über pulvermetallurgische Verfahren verstanden werden. Am IFAM Dresden werden verschiedene nanostrukturierte Werkstoffe mit verbesserten funktionellen Eigenschaften oder neuen Eigenschaftskombinationen auf Basis pulvermetallurgischer Technologien entwickelt.

Die pulvermetallurgische Herstellung nanodispersionsverfestigter Cu-Werkstoffe (Abb. 1) bietet die Möglichkeit, die gute elektrische Leitfähigkeit mit

einer wesentlich verbesserten Hochtemperaturfestigkeit zu kombinieren. Dadurch kann die Lebensdauer von Bauteilen, z.B. Schweißelektroden oder elektrischen Kontakten, erhöht werden.

Kohlenstoff-Nanofasern sind aufgrund ihrer exzellenten mechanischen und physikalischen Eigenschaften für eine Reihe von Anwendungen interessant. Die pulvermetallurgischen Möglichkeiten zur Einlagerung derartiger Fasern in metallische Matrices werden für die Herstellung nanofaserverstärkter Verbundwerkstoffe genutzt, bei denen höchste thermische Leitfähigkeit mit einem reduzierten thermischen Ausdehnungskoeffizienten für Anwendungen im Bereich des thermischen Managements elektronischer Bauelemente (Abb. 2) gefordert sind. Bei der Herstellung nanostrukturierter Werkstoffe muss generell das Kornwachstum während des Kompaktierens der Pulver vermieden werden. Ein geeignetes Verfahren stellt das Spark Plasma Sintern dar, ein modifiziertes Heisspressverfahren, bei dem neben Druck auch ein gepulster Strom für die Verdichtung der Pulver genutzt wird (Abb. 3a). Die direkte Heizung von Presswerkzeug und Sintergut erlaubt hohe Heizraten (bis > 300°C/min) und sehr kurze Prozesszeiten. Die derzeit einzige industriennahe Anlage in Europa, hergestellt von der Fa. FCT Systeme GmbH (Abb. 3b), steht ab 4. Quartal 2005 am IFAM Dresden zur Verfügung. Diese Technologie kann u.a. für die Herstellung thermoelektrischer Nanokomposite genutzt werden. Die Nanostrukturierung von geeigneten Legierungen erhöht aufgrund spezieller physikalischer Effekte im Vergleich zu konventionellen in der Regel einkristallinen Werkstoffen den Wirkungsgrad bei der Wandlung von Wärme in elektrischen Strom bzw. umgekehrt. Diese Effizienzsteigerung ermöglicht thermoelektrische Anwendungen im Bereich der mobilen (autarken) Energieversorgung, der Energierückgewinnung und der Kühlung elektronischer Komponenten.

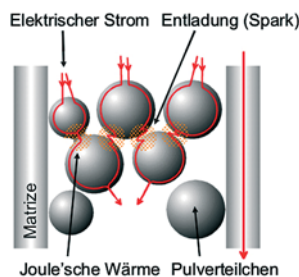


Abb. 3a:  
Schematische Darstellung  
der möglichen Strompfade  
beim SPS-Verfahren \*

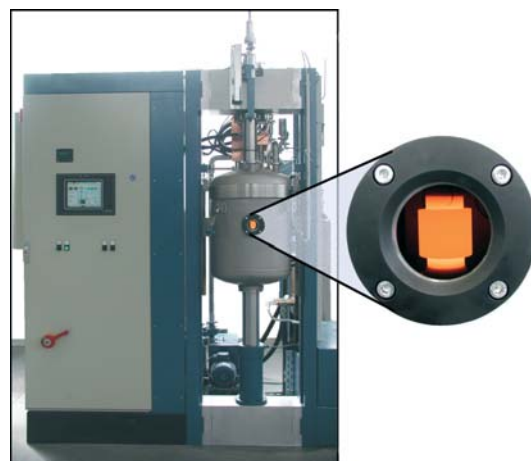
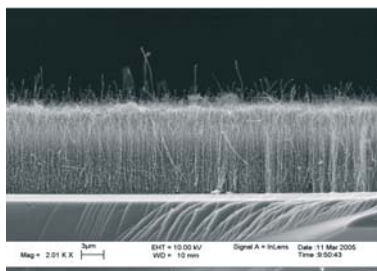


Abb. 3b: SPS/FAST Anlage der Fa. FCT Systeme GmbH  
(Quelle: [http://www.fct-keramik.de/fct/de\\_systeme\\_news.php](http://www.fct-keramik.de/fct/de_systeme_news.php))

Im IFW Dresden füllt man Kohlenstoff-Röhrchen von 10 Nanometern Durchmesser mit den magnetischen Metallen Eisen, Kobalt und Nickel und lässt diese kontrolliert auf strukturierten Siliziumscheiben aufwachsen. Anwendung könnten diese gefüllten Nanoröhrchen in der Krebstherapie finden.



Ein dichter Rasen aus nanometer-dünnen, ca. 12 mm langen Kohlenstoff-Nanotubes

**Kontakt:**  
 Leibniz-Institut für Festkörper- und  
 Werkstoffforschung Dresden  
 PF 270016  
 01171 Dresden  
 Dr. Ingolf Mönch  
 Tel.: +49-351-4659 674  
 E-Mail: i.moench@ifw-dresden.de  
 Dr. Albrecht Leonhardt  
 Tel.: +49-351-4659 299  
 E-Mail: a.leonhardt@ifw-dresden.de  
 www.ifw-dresden.de

## > Kohlenstoff-Nanoröhrchen mit magnetischer Füllung Krebstherapie an der Schnittstelle von Physik, Chemie und Medizin

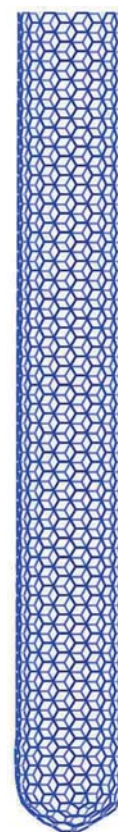
Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind winzige Röhrchen, deren Wände aus einer oder mehreren Atomlagen von Kohlenstoff bestehen. Wissenschaftlern des IFW ist es gelungen, diese Kohlenstoff-Nanoröhrchen von nur ca. 10 Nanometern Durchmesser mit den magnetischen Metallen Eisen, Kobalt und Nickel zu füllen und kontrolliert auf strukturierten Siliziumscheiben aufwachsen zu lassen. Die gefüllten Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind somit gut als Minimagnete oder magnetische Datenspeicher geeignet. Für die Funktionalität und Zuverlässigkeit möglicher Bauelemente ist es dabei von großem Vorteil, dass diese oxidationsfreudigen Metalle in dem Kohlenstoffmantel dauerhaft und wirksam vor chemischen Einflüssen geschützt sind.

Hergestellt werden die gefüllten Nanoröhrchen im IFW mittels Chemischer Gasphasenabscheidung, wobei die Füllung bereits während der eigentlichen Abscheidung der Kohlenstoff-Nanoröhrchen erfolgt. Die Stellen, an denen die Nanoröhrchen wachsen sollen, werden durch das vorherige Aufbringen kleinster Eisenpartikel auf die Siliziumscheiben bestimmt. Auf diese Weise können definierte Strukturen hergestellt werden.

Gemeinsam mit Wissenschaftlern der Abteilung Urologie des Universitätsklinikums der TU Dresden entstand die Idee, dass diese gefüllten Nanoröhrchen möglicherweise zur Diagnostik und Therapie bei bestimmten Krebserkrankungen angewendet werden können. Zu diesem Zweck müssten die magnetisch gefüllten Nanoröhrchen in das Krebsgewebe eingebracht werden. Das Anlegen eines äußeren Magnetfelds würde dann eine lokale Temperaturerhöhung des sie umgebenden Gewebes bewirken, was zum Absterben der Krebszellen führt. Dieses Prinzip der Hyperthermie ist seit langem bekannt; die Verwendung von Eisenpartikeln ohne Verpackung in Nanoröhrchen befindet sich derzeit in der klinischen

Testphase. Neu ist, die Partikel in biokompatible Kohlenstoff-Nanoröhrchen zu packen, wodurch sie reproduzierbar in kleinsten Abmessungen (nanometergroß) herzustellen sind. Darüber hinaus besteht ein großes Potenzial dieser neuen Idee darin, dass die Nanoröhrchen neben der Eisenfüllung auch mit weiteren Partikeln bestückt werden können, die eine zusätzliche therapeutische Wirkung oder die Funktion der lokalen Temperaturmessung haben. Es konnte bereits gezeigt werden, dass Tumorzellen mit funktionalisierten Kohlenstoff-Nanoröhrchen infiltriert werden können. Dennoch ist die Krebstherapie mit gefüllten Nanoröhrchen noch eine Vision, bei deren Verwirklichung noch viele Herausforderungen zu meistern sind. Zum Beispiel muss das definierte Öffnen, Füllen und Schließen partiell gefüllter mehrwandiger Kohlenstoff-Nanoröhrchen beherrscht werden. Außerdem muss die Wirkung der Nanoröhrchen im lebenden Organismus erforscht werden, wozu es bereits erste erfolgreiche Versuche gibt.

Ein wichtiger Aspekt bei der Umsetzung dieser Idee ist auch die Sicherung der Patente und die strategische Ausrichtung einer kommerziellen Nutzung. Aus diesem Grund wurde von den Kooperationspartnern die Firma Systemanix GmbH gegründet. Sie soll der Anwendung der Nanoröhrchen in der Medizin zum Durchbruch verhelfen und gleichzeitig Investoren zur Errichtung eines entsprechenden Therapie-zentrums gewinnen.



Struktur eines Kohlenstoff-Nanoröhrchens





**Fraunhofer** Institut  
Keramische Technologien  
und Sinterwerkstoffe

**Kontakt:**  
Fraunhofer-Institut für Keramische  
Technologien und Sinterwerkstoffe  
IKTS Dresden  
Winterbergstraße 28  
D-01277 Dresden  
Tel.: +49-351-25-53-7 20  
Fax: +49-351-25-53-6 00  
E-Mail: [info@ikts.fraunhofer.de](mailto:info@ikts.fraunhofer.de)  
[www.ikts.fraunhofer.de](http://www.ikts.fraunhofer.de)

Die Mikro- und Nanotechnologien sind im Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe Dresden ein fest integrierter Bestandteil moderner Werkstoff- und Systementwicklungen. Aktuelle nanotechnologische Projekte beschränken sich dabei nicht nur auf die Entwicklung neuer Werkstoffe, sondern auch auf deren Nutzung zur Herstellung komplexer Bauteile für verschiedenste Anwendungen, beispielsweise in der Medizin, dem Maschinenbau, der Mikroreaktionstechnik, der Werkzeugtechnik und der Mikroelektronik.



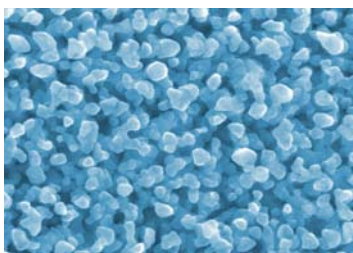
Muster eines hochfesten  
Kniegelenk-Implantates  
aus bioverträglicher  
Submikrometer-Keramik



Traditionell weiße Keramik  
wird durchsichtig durch  
Submikrometer- und Nanotechnologie.



Keramik für den ballistischen Schutz –  
Durch Aufbringen weniger Millimeter  
dünner transparenter Keramik-Plättchen  
auf Panzerglas ist eine deutliche  
Gewichtsreduzierung bei höherer Sicherheit  
und bei gleicher Beschuss-Sicherheit  
erreichbar.



Nanofiltrationsmembran  
aus Siliciumcarbid (SiC)

Mikro- und Nanotechnologien am Fraunhofer IKTS

## Leistungsschub durch Nanotechnik – auch in der Technischen Keramik

Die Eigenschaften dieser neuen Werkstoffe und Komponenten werden wesentlich durch deren Herstellungsprozesse bestimmt. Die Nano-Größe der Ausgangsstoffe ist hier ein neuer Innovationsträger. Die Sub-Mikro- oder Nanostruktur der fertigen Bauteile selbst führt unmittelbar zu ganz neuen Eigenschaften, angefangen von besonders hoher Verschleiß- und Temperaturbeständigkeit und Härte bis hin zur Transparenz.

Nanotechnik ermöglicht Komponenten höchster mechanischer, thermischer und chemischer Stabilität z.B. für energiesparende Hochleistungslampen, für technische Fenster oder für zivile und militärische Sicherheitsanwendungen. Es entstehen sowohl biomedizinische Komponenten, als auch neuartige Filtrations- und Katalyseprozesse.

Mit den am IKTS entwickelten nanokristallinen Siliciumnitrid- und Titanitrid-Werkstoffen kann unter Trockenlaufbedingungen eine bis zu 5fache Verbesserung im Reib- und Verschleißverhalten erreicht werden. Dadurch eröffnen sich weitere Leistungspotentiale und Anwendungen. Bereits heute erfüllen keramische Lager in Kompressoren und in der Mikroelektronik Funktionen, die bisher zur Vermeidung von Schmiermittelkontaminationen sehr aufwändige Lagerkonstruktionen notwendig gemacht haben. Eine nochmalige Erhöhung der Lebensdauer bei geringerem Wartungsaufwand ist mit den neuen Nanomaterialien zu erwarten. Außerdem entstehen innovative Anwendungen als Verschleißteile im Maschinenbau und in der Metallverarbeitung.

Die Härte der am Fraunhofer IKTS entwickelten nanokristallinen Wolframcarbid-Keramik ist vergleichbar mit den härtesten bekannten Materialien. Die überragenden mechanischen Kennwerte lassen sich z.B. dort vorteilhaft nutzen, wo hohe abrasive Beanspruchungen oder Angriffe von Säuren zu

bewältigen sind. Auf Grund der exzellenten Eigenschaften haben sich diese Materialien Anwendungsfelder in der Holzbearbeitung (Sägeblätter) und bei Verschleißteilen (Gleitbahnen) erschlossen.

Im Rahmen einer deutschlandweiten Fraunhofer-Allianz „Modulares Mikroreaktionssystem FAMOS“ wird derzeit ein modular aufgebautes, softwaregestütztes und weitgehend universell einsetzbares Mikroreaktionssystem mit auswechselbaren Reaktionsmodulen entwickelt. Ein Beispiel für die Kombination der Mikroreaktionstechnik mit der Nanotechnologie stellt ein keramisches Reaktionsmodul mit eingelegten Multikanalplatten dar, die, versehen mit einem Washcoat aus nanoskaligen Ausgangspulvern, Katalysatorträger aufnehmen können und auf diese Weise den Ablauf katalytisch gesteuerter Reaktionen im Mikromaßstab gestatten.

Basis unserer anwendungsorientierten Forschung im Bereich „Mikro- und Nanotechnologien“ ist die sichere Charakterisierung der Ausgangsmaterialien und erzeugten Werkstoffe. Im IKTS existieren langjährige Erfahrungen zur Charakterisierung von Nanopulvern und daraus hergestellten Suspensionen hinsichtlich Partikeleigenschaften und elektrokinetischem Verhalten bei nachfolgenden Prozessen mit moderner Messtechnik und akkreditierten Abläufen.

Das Fraunhofer IKTS Dresden ist federführendes Mitglied im Informations- und Beratungszentrum „TransNanoPowder“ und „NanoRoad“. Diese von der Europäischen Kommission unterstützten Projekte haben das Ziel, keramische Nanomaterialien vom Pulver bis zum Bauteil in gesicherter Qualität verfügbar zu machen und Unternehmen den Zugang zu diesen Werkstoffen zu ermöglichen. Darüber hinaus ist das IKTS aktives Mitglied im Nanotechnologie-Kompetenzzentrum „Ultradünne funktionale Schichten“ sowie im überregionalen NETZWERK für Materialien der Nanotechnologie NanoMat.

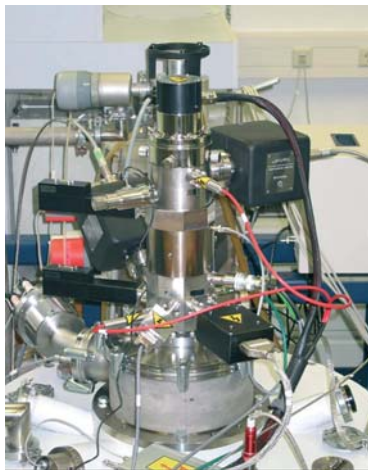


Abb. 1  
Fokussierter Ionenstrahl  
(FIB) zur Cobalt-Implantation  
im nm-Bereich

**Kontakt:**  
Forschungszentrum Rossendorf (FZR)  
Institut für Ionenstrahlphysik  
und Materialforschung  
Abteilung Prozesstechnologie:  
Dr. Bernd Schmidt  
Dr. Lothar Bischoff  
Dr. Chavkat Akhmedaliev  
Abteilung Theorie:  
Dr. Karl-Heinz Heinig  
Tel.: +49-351-260 2726 / 2963  
Fax: +49-351-260 3285  
Postfach 51 01 19  
01314 Dresden  
[www.fz-rossendorf.de](http://www.fz-rossendorf.de)

## Herstellung vergrabener Nano-Strukturen im FZR Nano-Drähte durch Ionenbeschuss

Die fortschreitende Miniaturisierung mikroelektronischer Strukturen sowie deren Kombination mit optischen, mechanischen oder magnetischen Komponenten erfordern laufend neue physikalische und technologische Ansätze. Im Forschungszentrum Rossendorf wird im Rahmen von zwei Projekten, getragen von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), intensiv an der Entwicklung und Untersuchung von Nanostrukturen für die Elektronik der Zukunft gearbeitet. So beschäftigt sich das FZR-Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung u. a. mit der reproduzierbaren Herstellung von maßgeschneiderten Nano-Drähten, die möglichst passfähig zur herkömmlichen Silizium-Technologie sein sollen.

Die Herstellung dieser Drähte beruht auf der Ionenstrahlsynthese, schematisch in Abb. 2 dargestellt. Hierzu werden feine Linien von Cobalt-Ionen mit dem fokussierten Ionenstrahl (FIB; Focussed Ion Beam) in ein Silizium-Substrat bei erhöhten Temperaturen implantiert und in einem folgenden Ausheilprozess zu einem Cobaltdisilizid-Draht ( $\text{CoSi}_2$ ) synthetisiert. Dabei wird die Kombination zweier wesentlicher Aspekte ausgenutzt. Zum einen wird der geringe Drahtdurchmesser durch die hohe

Fokussierbarkeit des FIB auf kleiner als 50 Nanometer erreicht, auch als „top-down“-Ansatz bezeichnet. Zum anderen führen selbstorganisierende Prozesse, ein „bottom-up“-Ansatz, zu einer weiteren Konzentration der implantierten Cobalt-Verteilung. Dies ermöglicht die Synthese von Nanostrukturen mit einem Durchmesser von 10 bis 20 Nanometer. Ein Beispiel eines derartigen Nanodrahtes wird in Abb. 3 gezeigt.

Der Schwerpunkt der Arbeiten konzentriert sich zunächst auf das zur Mikroelektronik-Technologie kompatible Cobaltdisilizid. Dieses Material ist metallisch, weist eine sehr gute Leitfähigkeit auf und ist hinsichtlich der Gitterstruktur der des Siliziums sehr ähnlich. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend, nun gilt es, die Reproduzierbarkeit sowie die genaue „Platzierung“ der Drähte im Material zu gewährleisten. Auf dem Weg hin zu neuen Nano-Bauelementen für die Mikroelektronik ist also noch viel zu tun.

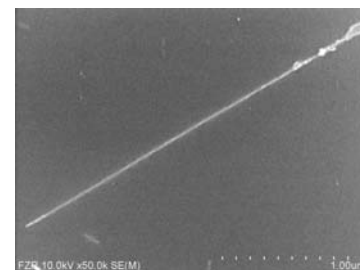


Abb. 3  
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines  $\text{CoSi}_2$ -Nanodrahtes, Länge ca. 4  $\mu\text{m}$ , Durchmesser: < 20 nm.

### FIB, $\text{Co}^{++}$ Implantation, 60 keV, bei ca. 400°C in Silizium

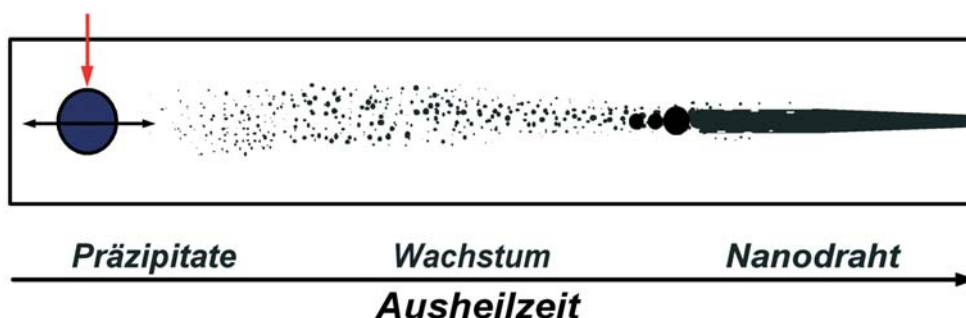


Abb. 2  
Ionenstrahlsynthese von  $\text{CoSi}_2$ -Nanodrähten (schematisch dargestellt)



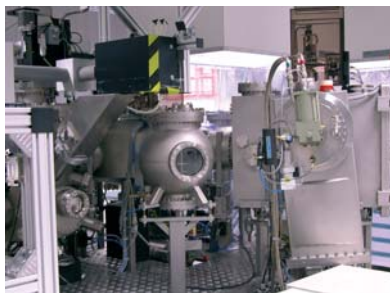
**Fraunhofer** Institut  
Werkstoff- und  
Strahltechnik

**Kontakt:**  
IWS Dresden,  
Fraunhofer-Institut für Werkstoff-  
und Strahltechnik  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden  
Dr. Stefan Braun  
Tel.: +49-351-2583-432  
Fax: +49-351-2583-314  
E-Mail: stefan.braun@iws.fraunhofer.de  
www.iws.fraunhofer.de



**AXO DRESDEN GmbH**  
Siegfried-Rädel-Straße 31  
01809 Heidenau  
Dipl.-Phys. Reiner Dietsch  
Tel.: +49-351-2583-249  
Fax: +49-351-2583-314  
E-Mail: reiner.dietsch@axo-dresden.de  
www.axo-dresden.de

Im Gegensatz zum sichtbaren Licht, das durch spiegelnde Reflexion an polierten Metalloberflächen im gesamten Einfallswinkelbereich nahezu vollständig reflektiert werden kann, gilt dies für Röntgenstrahlen außerhalb des sogenannten Totalreflexionsbereiches nicht. Dort werden im günstigsten Fall lediglich Reflexionsgrade von wenigen Prozent erzielt.



☒ Beschichtungsanlage zur Entwicklung und Herstellung von Nanometer-Multischichten mittels Puls-Laser-Deposition und Magnetron-Sputter-Deposition.



☒ Schwarzschild-Objektiv für die Röntgenmikroskopie im extrem ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich bei 13,5 nm.

Gemeinsame Entwicklungen von Fraunhofer IWS und AXO DRESDEN GmbH:

## Herstellung und Anwendung von Multischicht-Röntgenoptiken

Die Natur stellt mit den Kristallen periodische Strukturen bereit, an deren Netzebenen durch Vielfachreflexion und damit verknüpfter konstruktiver Interferenz der Teilstrahlen die effektive Spiegelung der Röntgenstrahlung ermöglicht wird. Allerdings besteht diese Möglichkeit entsprechend den verfügbaren Gitterkonstanten der natürlichen Kristalle nur für Röntgenwellenlängen bis ca. 2 nm. Für größere Wellenlängen müssen mittels Nanometer-Schichttechnologie regelmäßig aufgebaute Multischichtreflektoren künstlich erzeugt werden. Dazu werden in Analogie zum Kristallaufbau in periodischer Folge Nanometer-Schichten aus Materialien mit hoher und geringerer Elektronendichte gestapelt, so dass quasi ein künstlicher Schichtkristall mit bis zu 600 Doppellagen entsteht. Die Einzelschichtdicken liegen dabei je nach Wellenlänge und Anwendungsfall im Bereich von 0,5 bis 5 nm.

für optimale Performance nötigen Multischichtparameter wie z.B.

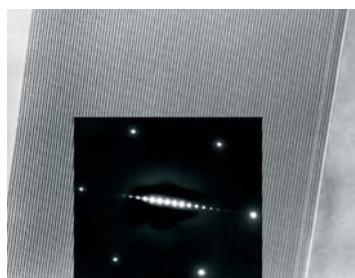
- strenge Regelmäßigkeit der Schichteigenschaften in Tiefenrichtung,
- geringst mögliche Rauheiten an den Grenzflächen zwischen zwei Materialien
- geringst mögliche Interdiffusion an den Grenzflächen der einzelnen Schichten,
- präzise Schichtdickenverteilungen in lateraler Richtung,
- Schutz der Oberfläche vor Oxidation und Kontamination

sowohl auf ebenen als auch auf gekrümmten Substratoberflächen erzielt werden.

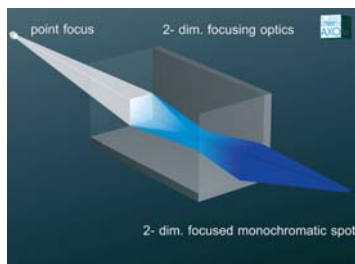
Die Einsatzgebiete von solchen Multischicht-Röntgenoptiken sind sehr vielfältig und erstrecken sich über die viele Gebiete wie zum Beispiel:

- Röntgenreflektometrie und -Diffraktometrie,
- Röntgenfluoreszenzanalyse,
- Röntgenmikroskopie,
- Extrem-Ultraviolett-Lithographie (EUVL),
- Synchrotronexperimente,
- Plasmadiagnose und Astronomie,
- Medizin.

Von besonderem Nutzen für die genannten Anwendungen sind die Möglichkeiten der Kollimierung und Fokussierung sowie der Monochromatisierung von Röntgenstrahlen durch diese Multischicht-Röntgenoptiken und dass diese Multischichten gezielt an die jeweilige Anwendung angepasst werden können. Neben der EUV-Lithographie liegen die hauptsächlichen Anwendungsmöglichkeiten solcher strahlformenden und monochromatisierenden Röntgenoptiken gegenwärtig in der Materialanalytik, wo sie einen wesentlichen Faktor bei der Verbesserung von z.B. Auflösungsvermögen und Nachweisempfindlichkeit moderner Analysengeräte darstellen.



☒ TEM-Abbildung einer Ni/C Multischicht, bestehend aus 200 Einzelschichten mit einer Dicke von  $d = 1,6$  nm



☒ Schema einer 2-dimensionalen strahlformenden Röntgenoptik zur Erzeugung eines hochintensiven monochromatischen Röntgenstrahls für analytische Anwendungen

Im Fraunhofer IWS und bei der AXO DRESDEN GmbH werden derartige ultrapräzise Multischichten entwickelt und hergestellt. Dabei gehören Röntgenoptiken für den gesamten Spektralbereich von der langwelligen weichen Röntgenstrahlung im EUV-Gebiet bis hin zum Bereich der durchdringenden harten Röntgenstrahlung mit Wellenlängen von 0,02 nm zum Entwicklungs- und Lieferprogramm. Die Vielzahl der sich daraus ergebenden Anwendungsmöglichkeiten der Röntgenoptiken über einen weiten Spektralbereich bedingt den Einsatz verschiedenster Materialkombinationen in Abhängigkeit von der jeweiligen Arbeitswellenlänge. Zum Erzielen optimaler Leistungsparameter ist es weiterhin erforderlich, ein für das jeweilige Materialsystem optimales Beschichtungsverfahren einzusetzen. Standardmäßig kommen dafür die Puls-Laser-Deposition (PLD), Magnetron-Sputter-Deposition (MSD) und Ionenstrahl-Sputter-Deposition (IBSD) zum Einsatz. Mit der Verfügbarkeit dieser unterschiedlichen und sich in ihren Prozessparametern ergänzenden Beschichtungsverfahren wird für jedes Materialsystem gewährleistet, dass die



Der Sprung von der Mikro- zur Nanoelektronik ist eine große Herausforderung für die Halbleiterindustrie. Am Fraunhofer-Center Nanoelektronische Technologien CNT in Dresden entwickeln Wissenschaft und Wirtschaft in Public Private Partnership gemeinsam neue Prozesstechnologien für die Nanoelektronik. Am 31. Mai 2005 fand die feierliche Eröffnung mit Gästen von Bund, dem Freistaat Sachsen, der Wissenschaft und Wirtschaft statt.



Das Fraunhofer CNT wird in den beiden rechten (hinteren) Gebäuden integriert sein (also im Reinraum und im Bürogebäude)  
Foto: Infineon



**Fraunhofer** Center  
Nanoelektronische  
Technologien

**Kontakt:**  
Fraunhofer-Center Nanoelektronische  
Technologien CNT  
Dr. Peter Kücher  
Königsbrücker Str. 180  
01099 Dresden  
Tel.: +49-351-2607-3001  
Fax: +49-351-2607-3002  
info@cnt.fraunhofer.de

## > Den Sprung von der Mikro- zur Nanotechnologie meistern: **Fraunhofer-Center Nanoelektronische Technologien CNT in Dresden eröffnet**

Die Halbleiterhersteller stehen derzeit vor der Herausforderung, die Strukturen bis unter 50 Nanometer weiter zu verkleinern und diese Innovationen schnell in die Fertigung zu implementieren. Die Halbleitertechnologie ist eine wichtige Grundlage für die Entwicklung in vielen anderen Branchen. Sie erschließt neue Produkte und Märkte. Nanoelektronische Technologien werden so zu einer umfassenden Basistechnologie.

Dresden bietet in Deutschland mit der laufenden 300-mm-DRAM-Fertigung der Infineon AG und den beiden Mikroprozessor-Werken von AMD ausgezeichnete Standortbedingungen für eine partnerschaftlich betriebene Forschungsplattform für Nanoelektronik. In den Reinräumen des CNT können die Industriepartner Infineon und AMD zusammen mit Fraunhofer-Forschern, der TU Dresden und weiteren Instituten Prozesstechnologien für die Fertigung der Nanoelektronik entwickeln. Das CNT ist offen für die Zusammenarbeit mit Material und Geräteherstellern.

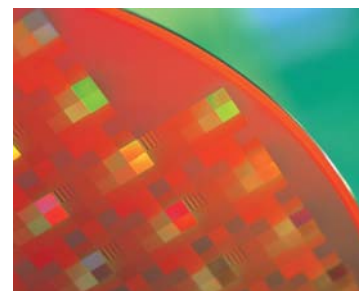
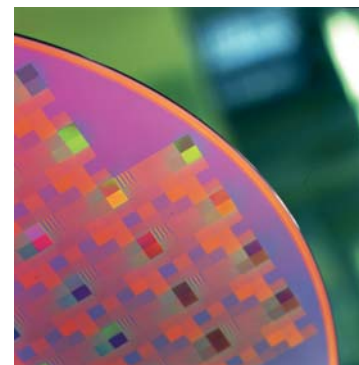
Insgesamt investieren Unternehmen und Staat zusammen erneut 700 Mio Euro in den Ausbau des Nanoelektronikstandorts Deutschland. Ein Drittel dieser Mittel stammen vom Bund, dem Land und der EU. Neben den Gebäudekosten unterstützen das BMBF und der Freistaat Sachsen die neue Fraunhofer-Einrichtung in den nächsten fünf Jahren mit Zuschüssen von insgesamt 80 Mio Euro für die Anlagen Erstausrüstung. Die Industriepartner planen in diesem Zeitraum Forschungsprojekte von rund 170 Mio Euro, die vom BMBF, dem Freistaat Sachsen und der EU-Kommission mit 85 Mio Euro gefördert werden.

Die Vertragsvereinbarung für das CNT sieht zunächst eine Laufzeit von fünf Jahren vor. Fraunhofer-Gesellschaft und Industriepartner stre-

ben den Betrieb einer dauerhaft betriebenen Forschungsplattform an. Entscheidend für die Fortsetzung werden Erfolg und Marktentwicklungen auf der einen und die Entwicklung der Förderlandschaft auf der anderen Seite sein.

Schwerpunkthemen sind die Bearbeitung ausgewählter Prozessschritte für die Fertigung von high-density-Speicherbausteinen sowie high-performance-Transistoren. Die Fraunhofer-Gesellschaft wird vor allem die Kompetenz ihrer Institute in den Bereichen Material- und Schichtsysteme, Basisprozesse, Aufbau- und Verbindungstechnologien, Entwurfstechniken und Lithografie einbringen. Nahezu 100 Entwicklungs- und Fertigungsingenieure der Industriepartner sowie wissenschaftliche Mitarbeiter der Fraunhofer-Gesellschaft werden im CNT innovative Lösungen für die Nanoelektronik erarbeiten.

Der Leiter des CNT, Dr. Peter Kücher, sieht in der Siliziumtechnologie noch großes Potenzial. Neue Erkenntnisse auf dem Feld der Lithographie ermöglichen es immer wieder, wesentliche Hürden auf dem Weg zur Strukturverkleinerung zu überwinden. »Jüngster Hoffnungsträger ist die Immersions-Lithografie, die bisher in der Mikroskopie eingesetzt wurde, aber nun für die Serienproduktion der Chips entdeckt wurde«, erklärt Dr. Kücher. »Sie erlaubt mit den derzeitigen Lichtquellen von 193 Nanometer Wellenlänge noch jenseits von 90 Nanometer Strukturbreite zu fertigen«. Wegen der hohen Kosten müssen Entscheidungen über die Weiterführung oder das Einstellen von Entwicklungen möglichst früh getroffen werden. Denn vom technisch Möglichen wird sich nur das durchsetzen, was am wirtschaftlichsten realisierbar ist. Das CNT in Dresden wird gemeinsam mit Infineon und AMD alles tun, damit innovative Halbleitertechnologien zukünftig noch öfter das Prädikat »Made in Germany« tragen.



300-mm-Wafer  
Fotos: Fraunhofer-Gesellschaft / Bernd Müller

**Kontakt:**  
**ASMEC**  
 Advanced Surface Mechanics GmbH  
 Bautzner Landstraße 45  
 01454 Radeberg OT Rossendorf  
 Dr. Thomas Chudoba  
 Tel.: +49-351-2695-345  
 Fax.: +49-351-2695-346  
 E-Mail: info@asmecc.de  
 www.asmecc.de



Abb. 1: Der Universelle Nanomechanische Tester – UNAT. Dieses Exemplar ist mit einem Rahmen aus Massiv-Silizium ausgestattet, der aber nicht zur Serienausführung gehört.



Abb. 2: Ritztest mit einer 50µm-Radius Diamantkugel in eine 5µm dicke Goldschicht. Die Normalkraft wurde von rechts nach links bis auf 2 N erhöht. Die Ritzlänge beträgt 140µm und die maximale Eindringtiefe 4,5µm. Das Bild wurde aus mehreren Bildern einer Fokusserie zusammengesetzt, um die nötige Schärfentiefe zu gewährleisten.

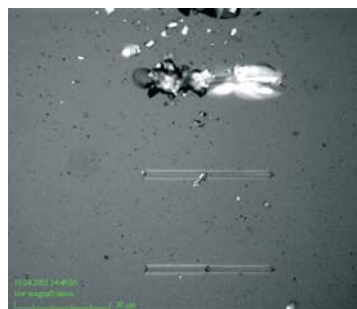


Abb. 4: Ritztests in Quarzglas. Die mittlere Spur gehört zu der Messkurve von Abb. 3. Bei der oberen Spur wurde die doppelte Normalkraft von 100mN verwendet. Während bei der kleineren Last nur plastische Deformation auftritt kommt es bei der höheren Kraft zu merklichen Ausbrüchen.

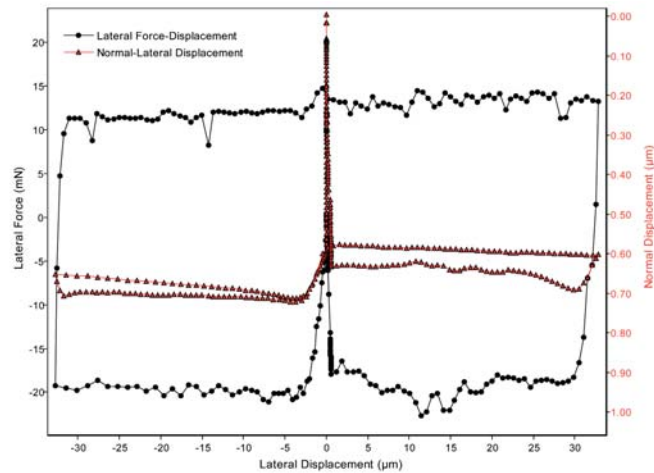


Abb. 3: Normale Eindringkurve (rot) und laterale Kraft-Verschiebungskurve (schwarz) einer Messung mit Berkovich-Pyramide bei 50 mN Normalkraft in Quarzglas. Man erkennt die Tiefenzunahme von einigen 10 nm bei Hin- und Rückbewegung der Messspitze.

## Neue Möglichkeiten der mechanischen Charakterisierung dünner Schichten: Der universelle Nanomechanische Tester der ASMEC GmbH

Die Firma ASMEC Advanced Surface Mechanics GmbH ist ein neu gegründetes Unternehmen, das seit März 2004 aktiv ist und aus dem Institut für Physik der TU Chemnitz heraus entstand. Das Unternehmen verfolgt das Ziel, Hard- und Software, sowie Mess- und Optimierungsdienstleistungen in Zusammenhang mit der Oberflächenmechanik zu entwickeln und aus einer Hand anzubieten. Seit April 2005 ist das neueste Produkt verfügbar, der Universelle Nanomechanische Tester UNAT (s. Abb. 1). Er stellt eine neue Geräteklasse dar, die mehr bietet als die bisher verfügbare Messtechnik zur mechanischen Charakterisierung. Im Gegensatz zu sogenannten Nanoindentern, Scratchtestern und Tribometern arbeitet er mit zwei senkrecht zueinander angeordneten Messköpfen die völlig unabhängig voneinander und mit annähernd der gleichen Kraft- und Wegauflösung arbeiten. Sie liegt bei maximalen Verschiebungen von  $\pm 100 \mu\text{m}$  im Bereich von 1-2 nm und bei maximalen Kräften von  $\pm 2 \text{ N}$  bei 5-10  $\mu\text{N}$ . Trotzdem kann eine sehr hohe Steifigkeit des Messsystems in die jeweils andere Richtung gewährleistet werden. Diese hohe Auflösung erlaubt es, sogenannte Kraft-Verschiebungskurven beim Eindringen von Diamantkörpern in die Oberfläche dünner Schichten zu messen, und daraus Materialparameter abzuleiten wie z. B. den Elastizitätsmodul oder die Fließgrenze. Das ist die Voraussetzung für eine zuverlässige mechanische Bewertung und Optimierung der Schichten. Die Diamantspitze kann sogar gegen beliebige feste Materialien ausgetauscht werden. Dadurch können die tatsächlichen Reibpaarungen, wie sie in der Praxis ständig auftreten, im Labor mit Nanometer-Auflösung nachgebildet und untersucht werden - und das auch bei Anwesenheit von Ölen und anderen Schmierfilmen. Mit dieser Methode lassen sich wertvolle Rückschlüsse für eine Optimierung der Schichtsysteme im Reibkontakt und für das gesamte Tribosystem gewinnen. Das Spektrum der mess-

baren Materialien erstreckt sich von weichen Polymeren bis hin zu ultraharten mechanischen Schutzschichten. Auch Schichten von nur wenigen Nanometer Dicke sind noch messbar, wobei es physikalisch bedingt Grenzen für die Ermittlung der einzelnen Parameter gibt.

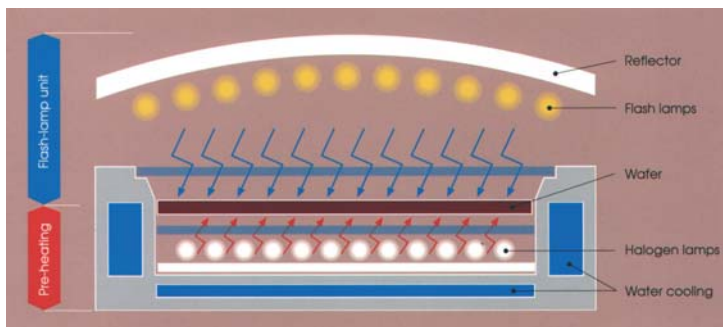
Das Gerät wird ergänzt durch eine hochauflösende Optik mit einer Vergrößerung bis 2180-fach. Optional kann auch ein Atomkraftmikroskop integriert werden, mit dem dann noch wesentlich höhere Vergrößerungen der Messstellen möglich sind. Durch die hohe Positioniergenauigkeit der absolut messenden Tischsysteme von  $1 \mu\text{m}$  und besser, gibt es keine Probleme beim Wiederfinden der Messstellen. Die Messpositionen können beispielsweise im optischen Bild angezeigt und per Mausklick festgelegt werden.

Durch die Kombination der zwei Messköpfe, die beide in Druck- und Zugrichtung arbeiten, ergibt sich eine Vielzahl neuer Messmöglichkeiten, die attraktive neue Forschungsthemen ermöglichen. So können z. B. laterale Anisotropien in Materialien festgestellt oder Ermüdungstests an Schichten durchgeführt werden. Viele mechanische Probleme aus der Beschichtungstechnik, der Mikrosystemtechnik, der Mikroelektronik, der Tribologie oder der Nanotechnologie lassen sich mit dem neuen Gerätetyp bearbeiten.

Die hohe Kompetenz der Mitarbeiter der ASMEC GmbH und die attraktive neue Messtechnik waren der Grund dafür, dass die Firma an vielen nationalen und internationalen Projekten beteiligt wurde, zusammen mit verschiedenen Fraunhofer Instituten, Universitäten und Firmen aus der Luftfahrt- und Automobilindustrie.

Wir eröffnen neue Dimensionen – unter diesem Leitspruch erschließt nanoparc für seine Kunden neuartige Nanostrukturen für optoelektronische Anwendungen, bietet Ionenimplantationsdienstleistungen in außergewöhnlich hohen Energiebereichen an und entwickelt Temperiersysteme für die Hochtemperaturbehandlung im Millisekundenbereich.

Blitzlampen-Schema  
der Blitzlampenanlage  
(Entwicklung in Kooperation mit  
der Firma FHR Anlagenbau)



**Kontakt:**  
nanoparc® GmbH  
Bautzner Landstraße 45  
01454 Dresden-Rossendorf  
Dr. Thoralf Gebel  
Tel.: +49-351 269 5350  
Fax: +49-351 269 5351  
E-Mail: [info@nanoparc.de](mailto:info@nanoparc.de)  
[www.nanoparc.de](http://www.nanoparc.de)

## > nanoparc GmbH: Nanotechnologie für Mikro- und Optoelektronik

Die nanoparc GmbH wurde im Juli 2000 aus dem Forschungszentrum Rossendorf bei Dresden ausgegründet. Das spin-off mit Branchenfokus Mikro- und Optoelektronik verfolgt als Unternehmensziel die Vermarktung von Produkten und Verfahren im Bereich der Nanotechnologie. Firmensitz ist das Technologiezentrum ROTECH in Dresden-Rossendorf.

Die Kompetenz des Unternehmens liegt in der Verfahrensentwicklung, Prozessintegration und der Herstellung von Nanoschichten und Nanostrukturen für die Mikro- und Optoelektronik. Den Produktschwerpunkt bilden Arrays von miniaturisierten Lichtquellen für den Einsatz als Plattformtechnologie in integrierten optischen Systemen, besonders im Sensorikbereich.

Applikationen der durch den Einsatz der nanoparc Technologie hergestellten Sensoren bzw. Lab-on-Chip Systeme sind schnelle Vor-Ort-Tests, z.B. als Schnelltests in der Wasserüberwachung und im Lebensmittelbereich sowie perspektivisch point-of-care Tests in der Medizin. Entscheidend ist dabei der Kostenvorteil im Vergleich zu komplexen Labortests.

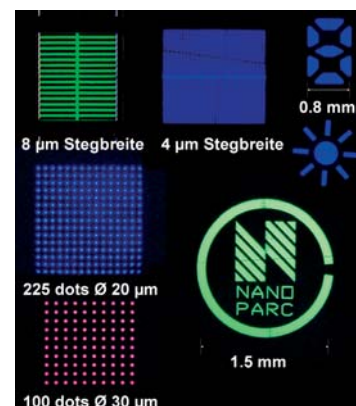
Nanoparc bietet darüber hinaus ein umfangreiches Dienstleistungsspektrum im Bereich der Ionenstrahltechnologie und der Blitzlampentemperatur an. Die von nanoparc gemeinsam mit Partnern entwickelten und angepassten Prozesse zur Oberflächenmodifizierung von Materialien werden sowohl von Unternehmen der Halbleiter-, der Solar- und der Optikindustrie als auch von Hightech-Firmen im Bereich innovativer Materialsysteme zur Behandlung von Nanoschichten nachgefragt.

Neben der Behandlung von Kleinserien stellt nanoparc in Kooperation mit der Firma FHR Anlagenbau

GmbH Blitzlampenmodule und -anlagen für die Integration in Produktionssysteme von Kunden her.

Die mit FHR entwickelte Blitzlampenanlage FLA-100 besitzt eine Blitzlampeneinheit mit einem parabolischen Reflektor und erlaubt die kurzzeitige Erzeugung von Temperaturen bis zu 2000°C auf der Oberfläche der zu behandelnden Produkte. Die Pulsdauer kann zwischen 0.5 und 20 Millisekunden eingestellt werden und erlaubt einen Energieeintrag von bis zu 120 Jcm<sup>-2</sup>.

Für Implantationsdienstleistungen im Bereich der Leistungshalbleiter steht am Forschungszentrum Rossendorf ein umfangreicher Maschinenpark zur Verfügung. Mit dem von nanoparc in Kooperation mit der IXYS GmbH aufgebauten automatisierten Waferhandler kann ein Durchsatz von bis zu 100 Wafern pro Stunde erreicht werden. Die Implantation von Wasserstoff- oder Heliumionen in Leistungsbaulemente wie Dioden oder Thyristoren verbessert deren Schaltverhalten und verringert die auftretende Verlustleistung.



Layout verschiedener Lichtquellen. Die Elemente der miniaturisierten Arrays können einzeln geschaltet werden.



Bestücken des Waferhandlers der Hochenergie-Implantationsanlage

Blitzlampenanlage  
FLA-100 (Kooperation mit der  
Fa. FHR Anlagenbau GmbH)





**Kontakt:**  
**NOVALED GmbH**  
 Dirk Schwipper  
 Tatzberg 49  
 D-01307 Dresden

Tel.: +49 351 796 58-22  
 Fax: +49 351 796 58-29  
[www.novaled.com](http://www.novaled.com)



Hochqualifizierte Forscher in modernsten Laboratorien (Foto: Weißflog)



Frisch aus der Denkfabrik:

## Modernste OLED-Technologien für Displays und Leuchtmittel



Das erfolgreiche Management Board der NOVALED GmbH:  
 Dr. Jan Blochwitz-Nimoth (CTO) und  
 Gildas Sorin (CEO)

**OLEDs sind organische Halbleiter mit der vorzüglichen Eigenschaft, Licht zu emittieren (abzustrahlen) – erzeugt werden diese Leuchtdioden aus nur wenigen hauchdünnen organischen Schichten.**

Die NOVALED GmbH ist weltweit führend in der Erforschung und Entwicklung dieser zukunftssträchtigen Technologie. Das Unternehmen hat sich ein sehr ehrgeiziges Ziel gesetzt: OLEDs mit höchster Leistungseffizienz zu entwickeln und zu vermarkten – und der Plan scheint aufzugehen! Obwohl noch ein junges Unternehmen, gehört die NOVALED GmbH bereits heute zu den Shootingstars am Technologiehimmel. Im Jahr 2001 als eine Ausgründung des Instituts für Angewandte Photophysik (IAPP) an der TU Dresden und des Instituts für Photonische Mikrosysteme (IPMS) der Fraunhofer-Gesellschaft Dresden gegründet, nahm das Haus eine rasante Entwicklung. Seit dem Start des operativen Geschäfts im Jahr 2003 hat es NOVALED in nur zwei Jahren zum Weltmarktführer in der Energieeffizienz von OLEDs gebracht. Das Unternehmen, eine reine „Denkfabrik“, die weltweit Spitzentechnologie „Made in Dresden“ exportiert.

Kernkompetenz der NOVALED GmbH ist die Verbesserung des Ladungstransports mit Hilfe von sog. dotierten Ladungstransportschichten (techn. Details siehe nächste Seite) – das Unternehmen hat bereits heute über 120 Patente (in mehr als 30 Patentfamilien) patentiert oder zum Patent angemeldet.

Speziell in Fernost sitzen die renommierten Kunden und Kooperationspartner des Hauses, darunter auch Größen wie etwa Samsung SDI oder Philips. Schon heute hält die OLED-Technologie

speziell im fernöstlichen Consumermarkt Einzug in die unterschiedlichsten Gebrauchsgegenstände, etwa als Display für Handys, Digicams und MP3-Player – als nächster Entwicklungsschritt sicher auch in Computerbildschirmen und TV-Geräten. Der „Industrielle Durchbruch“ ist geschafft, somit bald auch die Serienreife für größere Displayformate.

Schließlich steht die OLED-Technologie noch ganz am Anfang ihrer Erfolgsgeschichte – ein gewaltiger Zukunftsmarkt wartet auf seine Erschließung. Noch ist das Marktvolumen auf Grund des heute relativ geringen Einsatzspektrums recht klein, was sich jedoch rasant ändern wird. Bereits für das Jahr 2008 wird der weltweite Markt für den Einsatz der OLED-Technologie auf 3 Milliarden Euro geschätzt, allein für TV-, Display- und verwandte Anwendungen. Hinzu kommt als dritte Entwicklungsstufe, so prognostiziert CEO Gildas Sorin, ein Milliarden schwerer Absatzmarkt für innovative Leuchtmittel. Denn im Gegensatz zu heute gängigen Lichtquellen, etwa Glühlampen oder Neonröhren, können OLEDs nicht nur punktförmig sondern flächig Licht abstrahlen, was gänzlich neue Einsatzgebiete erschließt. Studien stellen etwa eine rundum leuchtende Autokarosserie für mehr Sicherheit im Straßenverkehr vor. Das Einsatzspektrum der OLED-Technologie ist gewaltig.

Auch als Arbeitgeber ist die NOVALED GmbH eine erste Adresse in Dresden. Bis zum Jahresende 2005 wird die innovative Denkfabrik rund 50 Mitarbeiter beschäftigen. ■



Physik- und Chemie-Laboratorien sowie der jüngst eingeweihte Reinraumkomplex prägen das Bild des erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsunternehmens (Foto: Weißflog)

### NOVALED-Unternehmens-Steckbrief:

**2001:**  
 Spin-off der TU Dresden (IAPP) und des Fraunhofer Institutes (IPMS)

Venture Capiatl 5 Millionen €

**2003:**  
 Start kommerzieller Aktivität

Weltweit führender Technologieanbieter für hocheffiziente OLEDs

**Umsatz:**  
 1,5 Millionen € 2004,  
 12,0 Millionen € 2008(e)

**Mitarbeiter:**  
 3/2003 – 3, 12/2003 – 17,  
 12/2004 – 37, 7/2005 – 45

Nominierung zum Deutschen Gründerpreis 2005

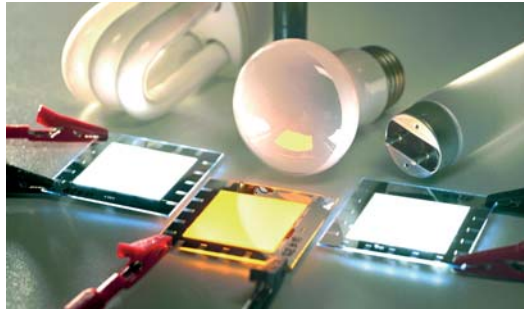
**IP Position:**  
 33 Patentfamilien mit mehr als 120 Patenten

**Weltrekord! Allein in diesem Jahr haben sich die Forscher und Entwickler des Dresdner High-Tech-Unternehmens NOVALED GmbH zwei Mal selbst übertroffen: Im Weißlichtbereich bringen sagenhafte 25 lm/W (Lumen pro Watt) NOVALED-Dioden zum Leuchten – diese Weltbestleistung entstand in enger Kooperation mit dem Hause Philips. Nirgendwo sonst auf der Welt erreicht man heute solch eine hohe Lichtausbeute. Führende Display-Hersteller haben folgerichtig reagiert und kooperieren mit der innovativen Dresdner Denkfabrik.**



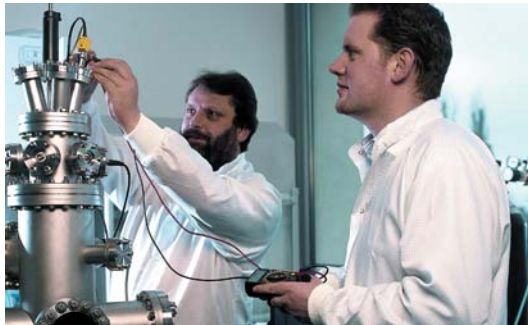
**Kontakt:**  
NOVALED GmbH  
Tatzberg 49  
D-01307 Dresden

**Tel.:** +49 351 796 58-0  
**Fax:** +49 351 796 58-29  
**www.novaled.com**



Lichtquellen von heute – und die Beleuchtungstechnik der Zukunft  
(Foto: Philips)

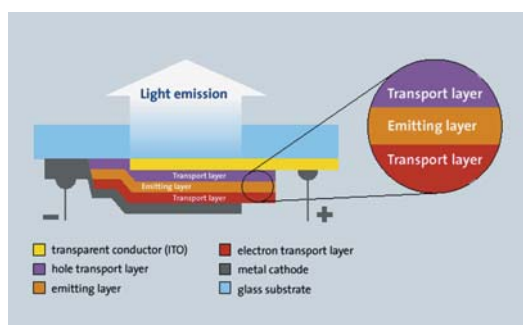
## Der industrielle Durchbruch in der OLED-Technologie: „Das beste Licht der Welt kommt aus Dresden!“



Als „die heimliche Hauptstadt der Erfinder“ genießt Dresden traditionell einen guten Ruf. Die Spiegelreflexkamera, das Fernsehgerät, das Rasterelektronenmikroskop, alles Dresdner Erfindungen; und auch heute bestimmen Innovations- und Tatkraft den Takt der Stadt. Große wie kleine Unternehmen der Hochtechnologie haben ihren Sitz in Elbflorenz.

So ist es nicht verwunderlich, dass Dresden im Jahr 2005 mit einem weiteren Superlativ aufwartet, denn es ist die Stadt „mit dem besten Licht der Welt“ – zumindest wenn es um OLEDs geht. Durch die Kombination hochentwickelter Materialsichten, die beim Anlegen von Spannung Licht abstrahlen, sind OLEDs prädestiniert für den Einsatz in ultraflachen Displays: Bei äußerst geringem Energieverbrauch erzeugen die organischen Materialsichten mit einer Dicke von nur je 200 Nanometern – etwa 1/50 der Dicke eines menschlichen Haares – brillante Farben und satte Kontrastwerte.

Im direkten Vergleich zu LCDs oder zu Plasmabildschirmen werden weitaus weniger einzelne Arbeitsschritte in der Produktion benötigt, was ein zusätzlicher Einsatzanreiz ist.

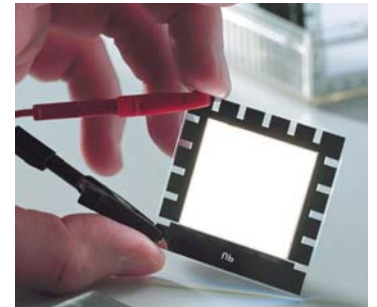


Ein ganz wesentlicher Ansatzpunkt des NOVALED-Technologieangebotes ist eine erhebliche Steigerung der Leistungseffizienz. CTO Dr. Jan Blochwitz-Nimoth stellt klar, daß bestehende OLED-Technologien weit unterhalb der technischen Möglichkeiten rangieren, sowohl in Bezug auf die Stromsparsamkeit als auch in Bezug auf die Lebensdauer der Bauelemente.

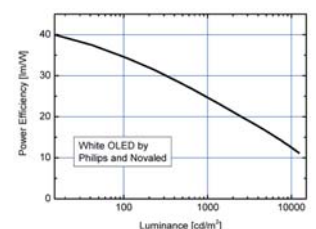
Die Verbesserung des Ladungstransports mit Hilfe von dotierten Ladungstransportschichten ist Kernkompetenz der NOVALED-Technologie – leitfähige Materialien werden gezielt „verunreinigt“ (dotiert) und liefern so in Verbindung mit einem optimierten OLED-Aufbau möglichst geringe Betriebsspannung und somit ein Höchstmaß an Leistungseffizienz.

Anders als LEDs haben OLEDs das Potential für den großflächigen Einsatz mit geringer Blendwirkung, da sie es ermöglichen, diffuses Licht in jeder denkbaren Farbe abzustrahlen. Zudem lassen sie sich leicht zu Mustern aus farbigem oder gleichmäßig weißem Licht strukturieren. In Fachkreisen ist man heute fest davon überzeugt, daß sich OLEDs innerhalb kurzer Frist als zweite Solid State Lichttechnologie am Markt etablieren werden. Die NOVALED-Forscher sind mit ihrer patentierten „invertierten top-emittierenden Struktur“ federführend in der Integration auf Aktiv-Matrix-Displays aus amorphem Silizium – dieses Ansteuerungsschema ist die Basis für künftige Video- und TV-Anwendungen – daher wird in diesem Zusammenhang auch vom industriellen Durchbruch gesprochen.

Prinzipielles Schema eines OLED-Aufbaus



Staunen in Anbetracht des technologischen Fortschritts: Nicht nur Display-Hersteller aus Japan, Taiwan und Südkorea sind angetan von der Technologie „Made in Dresden“ ...  
(Foto: Philips)



Ein weiterer NOVALED-Weltrekord: Leistungseffizienz von 25 lm/W bei einer Helligkeit von 1000 cd/m² bei Weißlicht emittierenden OLEDs





**Kontakt:**  
Innovation Relay Centre Saxony  
c/o BTI Technologieagentur Dresden GmbH  
Gostritzer Str. 61-63  
01217 Dresden  
Thematische Gruppe  
Nano- und Mikrotechnologie  
Dr. Michael Naumann  
Tel.: +49-351-871 7560  
Fax: +49-351-871 7556  
E-Mail: [irc@bti-dresden.de](mailto:irc@bti-dresden.de)  
[www.irc-sachsen.de](http://www.irc-sachsen.de)

Nanotechnologie und, verbunden mit ihr, Technologien der Mikrosysteme gehören zu den Schwerpunktthemen des europäischen Netzwerkes der Innovation Relay Centre (IRC). Dieses Netzwerk wurde durch die Europäische Gemeinschaft gegründet, um den Transfer innovativer Technologien von Unternehmen zu Unternehmen und von Forschungseinrichtungen zu Unternehmen zu initiieren, zu moderieren und durch begleitende Maßnahmen zu unterstützen.



Die Technologie-Datenbank der Thematischen Gruppe Nano- und Mikrotechnologien im Internet – Ihre Chance zur Kooperation

## Technologietransfer und Netzwerke Das IRC Saxony und seine Partner weisen den Weg zum europäischen Technologiemarkt

Die Innovation Relay Centres wurden durch eine öffentliche Ausschreibung innerhalb des 6. Rahmenprogramms für Forschung und technologische Entwicklung der Europäischen Gemeinschaft ausgewählt. Es existieren 71 IRC-Netzwerkknoten, an denen 240 Organisationen beteiligt sind und die bei regionalen oder nationalen Entwicklungsagenturen, Universitäten, Handelskammern, Technologieagenturen etc. angesiedelt sind. Sie erreichen alle europäischen Regionen: die 25 EU-Mitgliedsstaaten, Island, Norwegen, die Schweiz, Bulgarien, Rumänien sowie Israel, die Türkei und Chile. Die Klienten des IRC-Netzwerkes sind hauptsächlich kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die grenzüberschreitend ihre Technologien vermarkten wollen sowie Kooperationspartner für unternehmerische Innovationen suchen.

### Wozu dient das IRC Netzwerk?

Hauptziel des IRC Netzwerkes ist es, europäische Unternehmen in der Entwicklung ihrer Wettbewerbsfähigkeit zu unterstützen, indem deren technologische Basis und Innovationskraft gestärkt wird. Dazu dienen:

- die Initiierung und Etablierung technologieorientierter internationaler Kooperationen,
- die Vermarktung von Technologien,
- die Einwerbung technologischer Lösungen zur Verbesserung der technologischen Basis und des Know-hows im Unternehmen,
- die erfolgreiche Definition und Implementierung europäischer Forschungsprojekte.

### Internationales Technologie-Marketing mit dem Innovation Relay Centre Saxony (IRC Saxony)

Mit seinen 4 Partnerorganisationen – AGIL GmbH Leipzig, BTI Technologieagentur Dresden GmbH, TAC Technologieagentur Chemnitz GmbH, Eurotransfer- u. Beratungsring Neisse e.V. Görlitz – bahnt das IRC Saxony Wege für Unternehmen, die

auf dem EU-Markt ihre innovativen Lösungen anbieten und/oder neues Know-how europäischer Entwickler erwerben möchten, findet europaweit Anwender und bringt sie mit europäischen Entwicklern zusammen. Technologieangebote und/oder Technologienachfragen werden an potentielle Partner vermittelt. Der Service der Partner des IRC Saxony umfasst:

- Kommunikation der Technologien über das IRC Netzwerk,
- Kontaktanbahnung über Partner-IRC vor Ort,
- Kontaktvermittlung an Klienten,
- Gezielte direkte Partnersuche über Thematische Gruppen, Partner IRCs aus spezifizierten Ländern und/oder Branchen,
- Recherche nach Technologieprofilen potentieller Partner,
- Screening der Dossiers potentieller Partner,
- Begleitung bei Vor-Ort-Kontakten,
- Untersuchung der Rahmenbedingungen vor Ort (gesetzliche Vorschriften, EU-Richtlinien, Zertifizierungen etc.; dabei werden die relevanten Themen gemeinsam mit den Klienten innerhalb eines Recherche-Profiles definiert),
- Zusammenstellung und Vermittlung lokaler/regionaler und im Bedarfsfall überregionaler Ansprechpartner,
- Technische Unterstützung bei Verhandlungen vor Ort (jedoch keine Rechtsberatung).

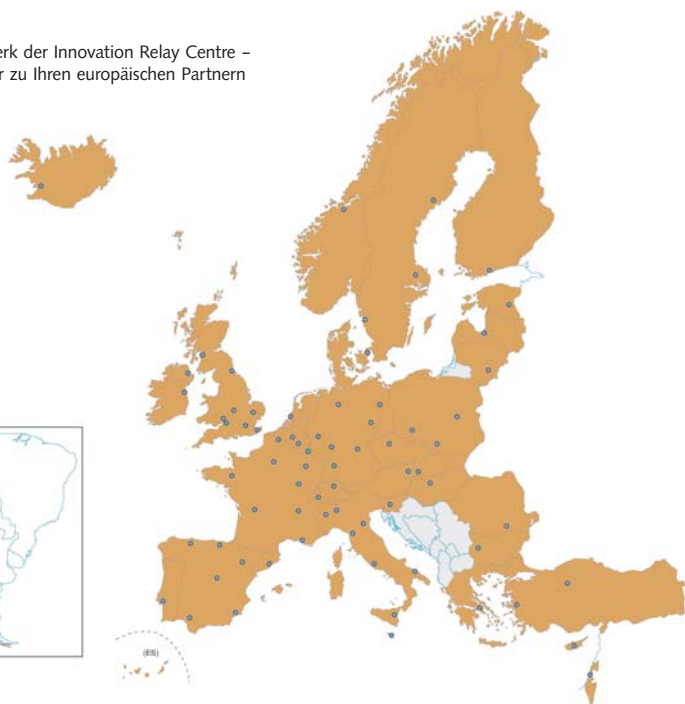
Im Kontext der sich entwickelnden Infrastruktur europäischer Netzwerke kooperiert das IRC-Netzwerk mit den Nationalen Kontaktstellen der verschiedenen Europäischen Forschungs- und Technologieprogramme, dem Netzwerk der Euro-Info-Centres (EIC) und dem Netzwerk der Innovations-Regionen (IRE) der Europäischen Union.

Das Innovation Relay Centre Saxony wird mit Mitteln des 6. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Gemeinschaft, sowie im Rahmen der





Das Netzwerk der Innovation Relay Centre –  
Wegbereiter zu Ihren europäischen Partnern



**Kontakt:**  
Innovation Relay Centre Saxony  
c/o BTI Technologieagentur Dresden GmbH  
Gostritzer Str. 61-63  
01217 Dresden  
Mathias Rehm  
Tel.: +49-351-871 7567  
Fax: +49-351-871 7556  
E-Mail: [irc@bti-dresden.de](mailto:irc@bti-dresden.de)  
[www.irc-sachsen.de](http://www.irc-sachsen.de)

Technologieförderung mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2000-2006 und mit Mitteln des Freistaates Sachsen partiell gefördert.

#### Die Thematische Gruppe Nano- und Mikrotechnologie

Ausgehend von den weithin bekannten Sektoren der Mikroelektronik und des Präzisionswerkzeugbaus, sind die wachsenden Auswirkungen der Nano- und Mikrotechnologien in den meisten Industriebereichen, z.B. in der medizinischen Technik, im Automobilbereich, in Haushalt- und Büroanwendungen, in Computern und in IT-Geräten, in Messgeräten, in der Biotechnologie usw., offensichtlich. Die Thematische Gruppe Nano- und Mikrotechnologie möchte dabei zur europaweiten Vernetzung beitragen durch:

- eine tief greifende Analyse der regionalen Kompetenzen und Bedürfnisse der Region jedes Gruppenmitglieds
- Organisation europäischer Veranstaltungen (Kooperationsbörsen oder zielgerichtete Firmenbesuche und Unternehmerreisen)
- Verwertung von FuE-Ergebnissen durch Kontakte mit existierenden nano- und mikrotechnologischen Netzwerken und besonders mit den Innovationszentren und den neuen Initiativen im 6. Forschungsrahmenprogramm
- Netzwerkarbeit mit den Clustern auf transnationalem Niveau
- Verstärkung der Kommunikation zu den Unternehmen und Forschungseinrichtungen des Sektors.

Die Thematische Gruppe Nano- und Mikrotechnologie betreut z. Z. mehr als 800 Organisationen mit ihren Technologieprofilen. Diese sind auch öffentlich für interessierte Organisationen recherchierbar über den Server für Forschung und Entwicklung der

Europäischen Gemeinschaft CORDIS unter:

<http://irc.cordis.lu> (Buttons: Special Group \_ Nano & Microtechnology \_ Showroom). Suchhilfen unterstützen die Recherche. Allgemeine Informationen zur Thematischen Gruppe mit den Kontaktdaten aller Mitglieder werden unter:

<http://irc.cordis.lu> (Buttons: Special Group \_ Nano & Microtechnology \_ Presentation) präsentiert.

Nachfolgend seien zwei Gesuche für technologische Kooperationen aus der Thematischen Gruppe Nano- und Mikrotechnologie beispielhaft vorgestellt:

#### **Enabling Technologies for protein arrays**

(Referenz: 05 GB LDLT OCKR)

Eine Firma aus der Umgebung von London würde gern mit Forschungsgruppen und Unternehmen zusammenarbeiten, die sich mit Protein-Array-Analyse beschäftigen. Die Firma sucht Kontakt mit Gruppen, die vorgefertigte Produkte oder Rohstoffe für die Protein-Array-Produktion liefert. Sie würde sich an Forschungsk Kooperationen, Lizenzvereinbarungen oder Gemeinschaftsentwicklungen beteiligen.

#### **Ultrahochvakuumtaugliche sterile Trockenläuferpumpen für die Luftumwälzung beim Nanopartikelnachweis**

(Referenz: 04 ES MAAM OBAM)

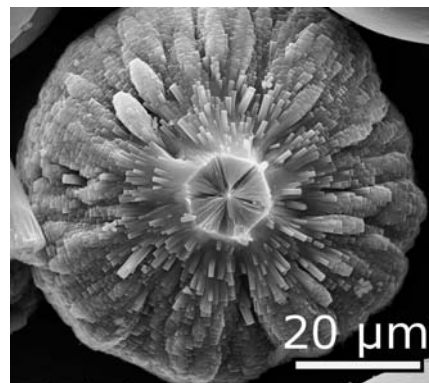
Ein spanisches KMU, tätig auf dem Gebiet von Nanopartikeldetektoren und DMA (Differentialen Beweglichkeitsanalysatoren), sucht eine sterile Trockenläuferpumpe für die Luftumwälzung. Die Pumpe darf keine Verschmutzungen durch die bei der Herstellung der Pumpe verwendeten Materialien und durch beim Betrieb verwendete Schmiermittel verursachen. Die Pumpe wird in ein Nanopartikel-Detektorsystem eingebaut, das überhaupt keine Verschmutzungen durch die Pumpe zulässt. Das System wird mit einem Massenspektrometer gekoppelt. Gesucht werden Hersteller für derartige Pumpen.





**Kontakt:**  
 Max-Planck-Institut  
 für Chemische Physik fester Stoffe  
 Prof. Dr. Rüdiger Kniep  
 Direktor  
 Nöthnitzer Str. 40  
 01187 Dresden  
 Tel.: +49-351-46 46 30 00  
 Fax: +49-351-46 46 30 02  
 E-Mail: kniep@cpfs.mpg.de  
 www.cpfs.mpg.de

Der thematische Schwerpunkt des Max-Planck-Instituts für Chemische Physik fester Stoffe liegt in der Herstellung und Untersuchung intermetallischer Verbindungen mit neuartigen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Aber auch zarte Pflänzchen eher „randständigen“ Charakters werden kultiviert, wie an einem Beispiel aus dem Bereich der Biomineralisation gezeigt wird. Unter dem Gesichtspunkt innovativer und interdisziplinärer Forschung (und Anwendung) ist dieses Gebiet allerdings hochaktuell.



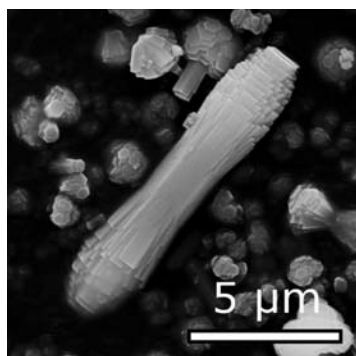
Fraktales Halb-Aggregat eines biomimetisch gewachsenen Apatit-Gelatine-Nanokomposits



Anorganisch-Organische Bio-Nano-Komposite

## Prinzipien der „Osteo- und Dentinogenese“ in biomimetischen Systemen mit reduzierter Komplexität

In biologischen (lebenden) Systemen werden Festkörper mit faszinierend schönen Formen als Funktionsmaterialien gebildet (z. B. Hartschalen von Schnecken und Muscheln). Solche Feststoffe werden Biominerale genannt und bestehen hauptsächlich aus einfachen anorganischen Verbindungen (z. B. Carbonate), die in hierarchischen Anordnungen auf der Nano-Skala strukturiert sind. Für den Menschen sind in diesem Zusammenhang die Funktionsmaterialien Knochen und Zähne von essentieller Bedeutung, die als anorganische Komponente Apatit, vereinfacht also  $\text{Ca}_5(\text{OH},\text{F})[\text{PO}_4]_3$ , enthalten. Osteo- und Dentinogenese sind an eine biologische Matrix gebunden, hier allgemein als Kollagen bezeichnet, welche in einer hierarchischen Struktur tripelhelicale Makromoleküle (sog. Faserproteine) enthält, die zu Mikrofibrillen und Fibrillen mit schließlich dreidimensionaler Vernetzung angeordnet sind (sog. unlösliches Kollagen). Für diesen Aufbau (im lebenden System) sind natürlich Stoffwechsel und Zellaktivitäten verantwortlich. Derartige Systeme stehen also in ihrer Komplexität auf einem sehr hohen Niveau.



Beginnende Aufspaltungen an den Enden eines biomimetisch gewachsenen Apatit-Gelatine-Nanokomposit-Keims. Ein Vergleich mit dem wachsenden Aggregat (Bild oben) belegt das Prinzip der Selbstähnlichkeit.

Den Abstieg in der Hierarchieleiter der Komplexität realisieren wir dadurch, dass auf „Leben“ im Sinne von Zellaktivitäten verzichtet und unlösliches Kollagen gegen lösliche Gelatine (denaturiertes Kollagen) ausgetauscht wird. Der letztgenannte Punkt ist wichtig, da auf diese Weise die Beweglichkeit der Makromoleküle gewährleistet ist, so dass bei Prozessen der Selbstorganisation auch Umorientierungen möglich sind. Die Komponente Apatit kommt in Form wässriger Lösungen der benötigten Ionen ins Spiel. Da Apatit sehr schwer löslich ist, werden die Calcium und Phosphat/Fluorid enthaltenden Lösungen getrennt voneinander an beide Seiten eines mit Gelatine-Gel gefüllten Reaktionsrohrs (horizontale Anordnung) angeschlossen und aufeinander losgelassen (sog. Doppel- oder Gegen-

strom-Diffusionstechnik). Dabei zeigt sich, dass sowohl das vereinfachte chemische System wie auch die experimentelle Anordnung offensichtlich sehr glücklich gewählt waren, denn in der Gelatine-Matrix spielen sich über biologische Zeiträume (Tage, Wochen) dramatische Prozesse der Selbstorganisation ab, welche sich vom mikroskopischen bis in den makroskopischen Bereich erstrecken und hierarchische Strukturen aufbauen. Möglicherweise wäre dieser Glücksumstand vorausszusehen gewesen, hat doch die Natur das „Stoffpaar“ Apatit-Kollagen im Zuge der Evolution über Jahrtausende optimiert.

Die Komposit-Aggregate sind zunächst auf der Nano-Skala strukturiert und enthalten Nano-Apatit-Mosaikstrukturen, die an Faserprotein-Tripelhelices nucleiert sind. In der Hierarchiefolge bauen diese kleinen Einheiten zunächst hexagonal-prismatische „Keime“ im  $\mu\text{m}$ -Bereich auf. Wenn diese ein kritisches Aspekt-Verhältnis erreichen, beginnen fraktale Aufspaltungen, die den Prinzipien der Selbstähnlichkeit gehorchen. Es gibt bereits Indizien dafür, dass die hierarchische Musterbildung (bis in den makroskopischen Bereich) von intrinsischen elektrischen Feldern gesteuert wird.

Aus Sicht der Forschung beinhaltet das hier vorgestellte System hervorragende Möglichkeiten, grundlegenden Prinzipien der Bildung und Entwicklung anorganisch-organischer Nano-Komposite auf die Spur zu kommen. Die unmittelbare Nähe und Verwandtschaft zu den Funktionsmaterialien Knochen/Zähne erlaubt Einblicke in Teilschritte der Osteo- und Dentinogenese. Daraus können Ideen zur Anwendung erwachsen, wie etwa das Beispiel einer Produktentwicklung auf dem Sektor „Dental Repair“ gemeinsam mit der Fa. SusTech Darmstadt zeigt.