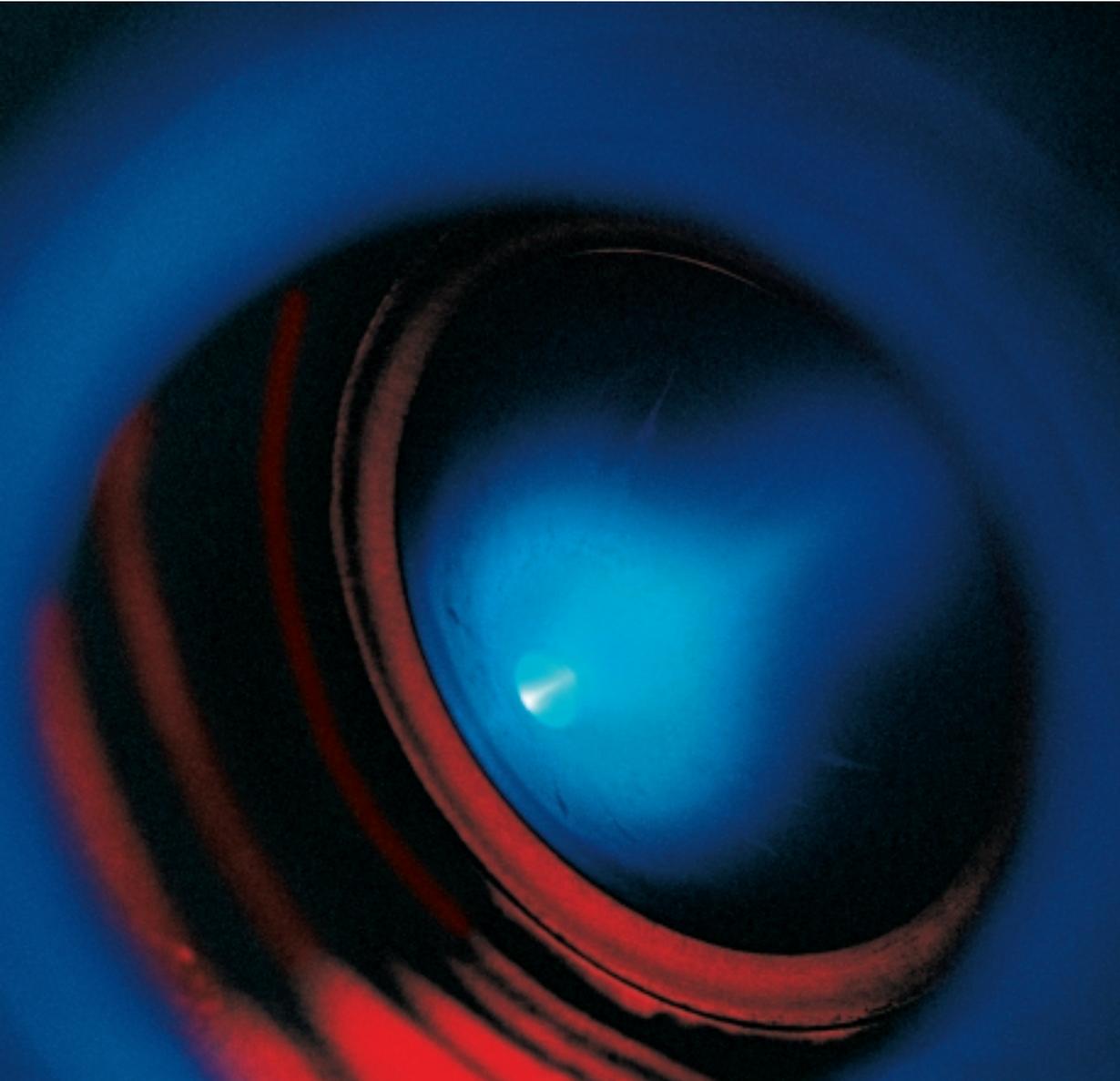


Die Fraunhofer-Gesellschaft in der Nano-Welt

Gerd Müller



Um die Leistung von Computerchips weiter zu erhöhen, werden in der Halbleiterfertigung Strukturgrößen unterhalb von 100 Nanometern angestrebt. Erreichbar ist dies mit Strahlung im Bereich des extremen UV-Lichts (EUV). Das Bild zeigt eine EUV-Strahlungsquelle.

Die Nanotechnologie ist ein Forschungs- und Entwicklungsbereich, an den sich in Öffentlichkeit, Politik und Wirtschaft hohe Erwartungen richten. In vielen Publikationen werden komplexe Szenarien beschrieben und große Hoffnungen geweckt; deren Realisierung in überschaubaren Zeiträumen lässt eine ernsthafte wissenschaftliche Analyse aber als sehr unwahrscheinlich erscheinen. In anderen wichtigen Bereichen hat die Nanotechnologie jedoch bereits Eingang in die industrielle Praxis gefunden oder wird dies in kurzer Zeit tun.

In dieser Übersicht soll beispielhaft dargelegt werden, was die Fraunhofer-Gesellschaft auf dem Gebiet der Nanotechnologie bereits leistet und welche Anwendungsziele sie verfolgt.

Was ist Nanotechnologie?

Häufig wird die Nanotechnologie als das wissenschaftliche Arbeitsfeld umrissen, das sich mit Objekten zwischen 1 und 100 Nanometer Größe befasst, wobei Funktion und Leistungsfähigkeit der Partikel durch eben diese Größe geprägt werden. Ein Beispiel sind die elektronischen und photonischen Quanteneffekte, die bei etwa 1 Nanometer an die molekularen Eigenschaften anschließen und bei 10 oder einigen 10 Nanometern in die aus der makroskopischen Welt bekannten Kristalleigenschaften übergehen. Beugung und Streuung in der klassischen Optik treten als Effekte dann besonders in Erscheinung, wenn Objekte in ihrer Größe ähnlich den Wellenlängen der betrachteten elektromagnetischen Strahlung werden. Wegen der Bedeutung neuartiger optischer Bauelemente werden wir im Folgenden daher die obere Grenze der Nanotechnologie etwas großzügiger bei einigen 100 Nanometern – also ungefähr der Wellenlänge des sichtbaren Lichts – ansetzen.

Auf eine Umfrage im Frühjahr 2002 meldete ein Drittel aller Fraunhofer-Institute, bereits auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätig zu sein, die dabei eingesetzte Personalkapazität umfasste insgesamt rund 300 Mitarbeiter. Inhaltliche Schwerpunkte bildeten die Nanomaterialien einschließlich dünner oder strukturierter Schichten, die Nanoelektronik und die Nanobiotechnologie. Etwa diesem Gliederungsprinzip wird auch der Artikel folgen.

Nanomaterialien und ihre Prozesstechnik

Viele Stoffe, so etwa die meisten Oxide und Kohlenstoffverbindungen, sind für weite Bereiche des elektromagnetischen Spektrums, darunter das sichtbare Licht, an sich transparent. Dass Keramiken und viele Kunststoffe dennoch opak weiß oder höchstens durchscheinend sind, liegt daran, dass sie aus einem oder mehreren Bestandteilen aufgebaut sind, die optisch anisotrop sind und/oder unterschiedliche Brechzahlen haben und damit Lichtstreuung verursachen. Solche Effekte verschwinden aber, wenn alle derartigen Bestandteile wesentlich kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts.

Bei Sinterwerkstoffen wie den Keramiken ist erste Voraussetzung, dass die verwendeten Ausgangskorngrößen bereits dieser Forderung entsprechen. Die chemische Industrie bietet seit einigen Jahren Oxidpulver in nanoskaliger Körnung an. Eine Schwierigkeit bei der Verarbeitung solcher Nanopartikel stellt jedoch deren generelle Neigung zur Agglomeratbildung (Zusammenlagerung) dar, bedingt durch ihre hohe spezifische Oberfläche und die damit verbundenen starken Wechselwirkungskräfte. Darüber hinaus muss das Wachstum der Nanopartikel während des Sinterprozesses unterdrückt werden.

Im Falle der technisch wichtigen Al_2O_3 -Keramik ist dies einer Arbeitsgruppe am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe IKTS durch eine Technologieentwicklung gelungen, die die Herstellung konzentrierter Suspensionen der Nanoteilchen ebenso umfasste wie die Formgebung und den Sinterprozess selbst. Ergebnis ist eine α - Al_2O_3 -Keramik, die wegen ihrer hohen Transparenz für lichttechnische Anwendungen ebenso vielversprechend ist wie wegen ihrer hohen Festigkeit für Panzerungen.

Auch in Kunststoffen geht die Transparenz verloren, wenn sie kristalline Bereiche hinreichender Größe oder andere Inhomogenitäten enthalten. Transparent sind daher nur die glasigen Polymere wie Polycarbonat, PMMA (Plexiglas) oder auch die organisch vernetzten anorganischen Hybridpolymere (ORMOCER®e). Letztere enthalten zwar außer den organischen Ketten auch anorganische Bestandteile, jedoch sind die Struktureinheiten allenfalls wenige Nanometer groß und kovalent miteinander verknüpft, bilden also einen nanoskaligen molekularen Verbundwerkstoff. ORMOCER®e, die am Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC entwickelt wurden, werden für unterschiedliche Anwendungen industriell eingesetzt, z. B. für den Verschleißschutz transparenter Polymere.

Für viele Zwecke, etwa zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit (Antistatikfunktion), zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Versteifung oder Verringerung von Verschleiß) oder zur Unterdrückung der Schadstoffdurchlässigkeit, wird angestrebt, in Polymere andersartige, meist anorganische Füllstoffe einzuarbeiten. Auch hier sind Partikelgrößen im Nanometerbereich bezüglich ihrer Funktion größeren Partikeln in der Regel überlegen und, wenn optische Transparenz gefordert wird, unabdingbar. Mehrere Fraunhofer-Institute bearbeiten Synthese und Handhabung unterschiedlichster Sorten solcher Nanopartikel. So stellt das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM nanoskalige Silberpartikel für die antibakterielle und elektrisch leitende Ausrüstung von Polymeren her und verbessert durch Einbau von winzigen, wenige Nanometer großen Blättchen aus Schichtsilicaten die mechanischen Eigenschaften von Polymeren. Am Fraunhofer-Institut für die Silicatforschung ISC synthetisiert man oxidische Nanopartikel als Röntgenabsorber und zur Erhöhung von Brechzahl oder Dielektrizitätskonstante von konventionellen Polymeren und Hybridpolymeren. Zur besseren Anbindung an das polymere Netzwerk und damit zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften sind die Oberflächen der Partikel in der Regel mit reaktiven Gruppen funktionalisiert.

Auch für nanoskalige Füllstoffzusätze zu Polymeren spielt die erwähnte Agglomerationsneigung der Nanopartikel eine entscheidende Rolle. Sie muss in allen Prozessschritten von der Synthese bis zur Dispersion im Polymer unterdrückt werden. Für hochgefüllte Polymerfilme wird am Fraunhofer IFAM ein Herstellungsverfahren entwickelt, bei dem gleichzeitig mit der Erzeugung metallischer Nanopartikel eine Plasmapolymersation durchgeführt wird. Die auf diese Weise hauchdünn beschichteten Nanopartikel agglomerieren nicht mehr und können separiert in einen Polymerfilm eingebracht werden. Wird die Agglomeratbildung verhindert, so können den polymeren Werkstoffen neue Eigenschaftskombinationen und damit Anwendungsfelder erschlossen werden.

Die hohe Sinterneigung nanoskaliger Metallpartikel kann andererseits auch vorteilhaft in der Verbindungstechnik eingesetzt werden: So hat man am Fraunhofer IFAM ein Verfahren entwickelt, um flächige Substrate mittels nanoporöser Zwischenschichten bereits bei Raumtemperatur leitfähig miteinander zu verbinden (Drucksintern).

Ein »Füllstoff« besonderer Art ist Luft. Wegen des großen Brechzahlenunterschiedes von Luft und Festkörpern streuen Poren in einem Feststoff das Licht besonders stark. Auch hier aber verschwindet diese Streuung, wenn die Poren fein genug sind. Diesen Umstand nutzt die Industrie bereits bei der Produktion von solaren Antireflexschichten auf Flachglas, mit deren Hilfe die Effizienz von Solarkollektoren und Photovoltaikanlagen deutlich gesteigert werden kann. Die Antireflexschicht besteht hier aus einer nanoporösen SiO_2 -Schicht. Schichtdicke (~ 120 nm), Porosität (~ 50 Prozent) und damit mittlere Brechzahl (~ 1.23) sind so eingestellt, dass eine optimale Entspiegelung im gesamten solaren Spektralbereich resultiert (Bild 1). Diese Entwicklung wurde von den Fraunhofer-Instituten für Solare Energiesysteme ISE und für Silicatforschung ISC und den Firmen Merck und Flabeg durchgeführt.

Einen alternativen Weg zur Entspiegelung lehrt die Natur. Die Augen von nachtaktiven Motten tragen auf ihrer Oberfläche periodisch angeordnete Noppen von wenigen 100 Nanometer Durchmesser und Höhe. Sie täuschen einer Lichtwelle einen stetigen Übergang der Brechzahl von Luft zum Festkörper vor und wirken damit ebenfalls entspiegelnd (Bild 2). Am Fraunhofer ISC und am Fraunhofer ISE wird daran gearbeitet, dieses Prinzip durch großflächige Prägung solcher mit photolithographischen Methoden erzeugter Strukturen in anorganische oder hybride Beschichtungsmaterialien auf technische Oberflächen zu übertragen.

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM nutzt zur Strukturierung der Prägwerkzeuge die selbstorganisierte Strukturbildung von PVD-Schichten. Auf diese Weise können auch konventionelle Werkzeuge aus Stahl, insbesondere auch solche mit gekrümmten Oberflächen, mit stochastischen, mottenaugenähnlichen Strukturen versehen und in organische Gläser abgeformt werden. Neben der Entspiegelung führt die Strukturierung auch zur Verringerung der Verschmutzungsneigung der Oberfläche.

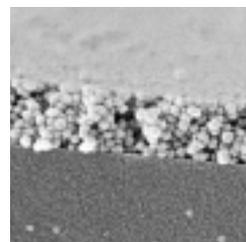


Bild 1

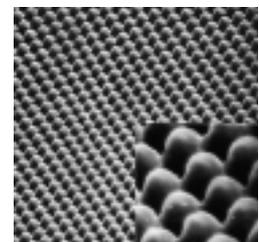


Bild 2

Während bei diesen Verfahren der Oberflächenveredelung Beugungs- oder Streueffekte bewusst vermieden werden, nutzt man die Beugung elektromagnetischer Wellen bei neuartigen Abbildungsoptiken für Röntgen- und EUV-Strahlung gezielt aus. Die Aufgabe besteht hier darin, über physikalische Abscheideverfahren großflächig auf Siliziumsubstrate periodische Multischichten aufzubringen, die abwechselnd z. B. aus Wolfram und Silizium oder aus Nickel und Kohlenstoff bestehen. Die Einzelschichten sind wenige Nanometer dick und müssen mit einer kaum vorstellbaren Präzision bezüglich Dicke und Glätte abgeschieden werden. Bild 3 zeigt eine Nickel-Kohlenstoff-Schichtfolge aus 50 Perioden mit 4,6 Nanometern Dicke. So ist es beispielsweise dem Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden gelungen, EUV-Spiegel (MoSi) mit einem Reflexionsvermögen von 71,4 Prozent herzustellen. Manchmal sind zusätzlich noch Sperrschichten nötig, um Diffusion und Reaktion, z. B. zwischen Silizium und Molybdän, zu verhindern. Die Fraunhofer-Institute für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und für Werkstoff- und Strahltechnik IWS erbringen auf diesem Gebiet Spitzenleistungen, die den weltweiten Vergleich nicht scheuen müssen. Sie tragen gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, das EUV-Strahlquellen entwickelt, und weiteren Partnern dazu bei, dass Europa bei der EUV-Lithographie wettbewerbsfähig bleibt. Dieses Verfahren, das extrem kurzwelliges UV-Licht verwendet, wird voraussichtlich die Schlüsseltechnologie bei der Herstellung künftiger Generationen von Halbleiter-Bauelementen.

Nanoelektronik und Nanophotonik

Auch in der optischen Kommunikationstechnik werden Bauelemente, deren Wirkung auf der Beugung des Lichtes an periodischen nanoskaligen Strukturen beruht, erhebliche Bedeutung gewinnen. Dies gilt besonders für die so genannten photonischen Kristalle, die ganz neue Möglichkeiten zur Führung von Lichtwellen erschließen. Die am Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC entwickelten hybriden Polymere (ORMOCER®e) sind eine aussichtsreiche Materialklasse für die Herstellung photonischer Kristalle und anderer nanoskaliger Strukturen durch das Verfahren der 2-Photonen-Polymerisation (Bild 4). Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF befasst sich bereits mit der Frage der Ankopplung von photonisch-kristallinen Wellenleitern an andere mikrooptische Bauteile. Auch im Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik ist die Integration von photonischen Übertragungsstrecken in mikroelektronische Systeme mithilfe von photonischen Kristallen ein Thema von hoher strategischer Bedeutung.

Die eigentliche Nanoelektronik, gekennzeichnet durch Begriffe wie Ein-Elektronen-Transistor, Spintronics oder Molekular-Elektronik, steckt heute noch weitgehend im Bereich der physikalischen Grundlagenforschung. Hier werden typische Bottom-up-Ansätze verfolgt, deren technische Realisierung noch schwer einzuschätzen ist. Umgekehrt ist die Miniaturisierung von Halbleiterstrukturen in evolutionärer Weise, z. B. bezüglich der Gateoxiddicken in Feldemissions-Transistoren, schon längst in den nanoskaligen Bereich vorgestoßen. Der Einsatz neuer Materialien und die Kontrolle des Schichtaufbaus auf atomarer Skala stellen hier die große Herausforderung dar. Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB untersucht neue Verfahren speziell für zukünftige Transistorgenerationen. Auch die weitere Verkleinerung der lateralen Strukturen ist durch die Roadmaps der Mikroelektronik vorgezeichnet. Bild 5 zeigt am Fraunhofer IISB mit Elektronenstrahltechniken hergestellte kleinste Wachstumskeime für ferroelektrische Strukturen, die für neuartige Halbleiterbauelemente von großem Interesse sind. Dass hierfür Nanotechnologie zur Herstellung der Strukturierungsanlagen unverzichtbar wird, wurde oben bereits am Beispiel der EUV-Lithographie gezeigt.

Auch ganz neuartige nanoskalige Komponenten finden Eingang in die Welt der Mikroelektronik. Prominentes Beispiel sind die Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes), die in den letzten Jahren aus der Grundlagenforschung der Chemie heraus zugänglich wurden. Es scheint absehbar, dass mit ihrer Hilfe besonders schnelle Transistoren ebenso realisiert werden wie Feldemissions-Displays mit Nanotube-Elektroden, die besonders niedrige Kaltmissionsspannungen und hohe Stromfestigkeit aufweisen werden. An diesen Entwicklungen sind Institute des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik bereits intensiv beteiligt.

Die Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe TEG wirkt an Arbeiten mit, wo aus Carbon-Nanotube-Fasern freitragende Filme («Bucky Paper») hergestellt werden, die eine aktorische Funktion aufweisen. Anwendungen dieser Materialien sind z. B. als künstlicher Muskel vorstellbar.

Aus dem Gesagten wird deutlich, dass Material- und Prozessentwicklung und die Integration der daraus resultierenden Bauteile in Systeme immer das Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen erfordern. Wegen des Sprungs in bislang unvertraute Dimensionen ist dies gerade im Bereich der Nanotechnologie unverzichtbar. Für die Fraunhofer-Gesellschaft bieten sich durch die Zusammenführung ihrer weit gefächerten Kompetenzen hier ganz besondere Chancen.

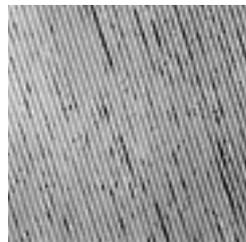


Bild 3

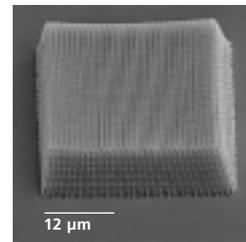


Bild 4

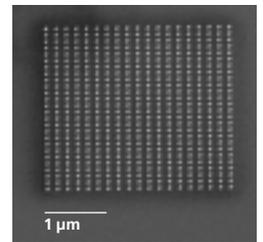


Bild 5

Nanoanalytik und physikalische Modellierung

Nachdem viele konventionelle Methoden bei der Charakterisierung nanoskaliger Objekte an ihre Grenze stoßen, ist auch die Weiterentwicklung analytischer Methoden eine für den Erfolg der Nanotechnologie wesentliche Voraussetzung. Die Rasterkraftmikroskopie und verwandte Verfahren sind für diese Aufgabenstellungen besonders leistungsfähige Methoden, deren Potenzial laufend erweitert wird. Das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP leistet hierzu wichtige Beiträge. Die Ultraschall-Kraft- und Reibungsmikroskopie, die Kontaktresonanzspektroskopie und der Ultraschall-Piezo-Mode sind dynamische rastersondenmikroskopische Techniken, die am Fraunhofer IZFP entwickelt wurden. Sie gestatten die Abbildung und quantitative Bestimmung von lokalen elastischen, piezoelektrischen und Reibungseigenschaften von Probenoberflächen mit einer Ortsauflösung von ca. 10 Nanometern (Bild 6 a: Topographie; 6 b: Ultraschall-Mode; 6 c: Ultraschall-Piezo-Mode; Bildausschnitt jeweils $10 \times 10 \mu\text{m}$). Die Verfahren beruhen darauf, das Schwingungsverhalten der miniaturisierten Blattfedern, die den Sensor des Kraftmikroskops bildet, im Ultraschall-Frequenzbereich auszuwerten und ihre Eigenresonanzen zu beobachten. Die Auswertung der Torsionsresonanzen gibt Auskunft über lokale Reibungseigenschaften und gestattet z. B. die Untersuchung dünner Schmierfilme.

Nanoanalytik mittels Rastersonden erfordert auch bei der Herstellung dieser Sonden hoch entwickelte Technik und modernste Verfahren. Am Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB werden spezielle Rasterkraftsonden mit integrierter Funktionalität hergestellt. Bild 7 zeigt eine Sonde für die optische Nahfeldmikroskopie. Die optische Apertur wurde mittels fokussierter Ionenstrahlen auf der Spitze der metallbeschichteten Siliziumsonde hergestellt. Der Aperturdurchmesser beträgt 60 Nanometer.

Bei der geometrischen (Rauigkeit) und mechanischen (Reibung, Härte und Verschleiß) Charakterisierung dünnster Schichten leisten auch die Fraunhofer-Institute für Schicht- und Oberflächentechnik IST, für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und für Werkstoff- und Strahltechnik IWS wesentliche Beiträge in der Methodenentwicklung.

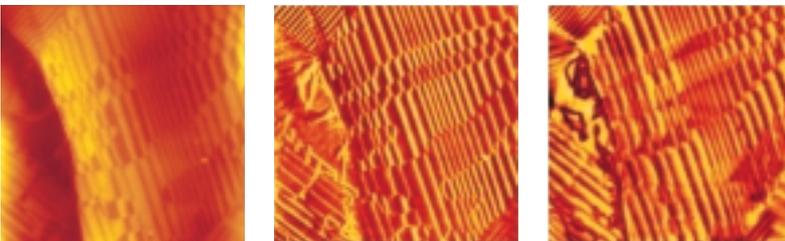


Bild 6 a–c

Wie bei der Charakterisierung von »trockenen« Proben mit der Rasterkraftmikroskopie müssen auch die Untersuchungsmethoden für »nasse« Proben, d. h. für Dispersionen und Emulsionen, mit der Weiterentwicklung der Prozesstechnik für Nanomaterialien Schritt halten. Hier hat sich für die Partikelgrößenanalyse seit vielen Jahren die Photonen-Korrelations-Spektroskopie (PCS) als klassische Methode etabliert. Am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM wurde dieses Verfahren weiterentwickelt, um nicht nur hochgradig verdünnte, sondern auch trübe und konzentrierte Proben der Charakterisierung zugänglich zu machen. Das Schlüsselprinzip der neuen Technik (3-D-Kreuzkorrelation) – ein »optischer Filter« für einfach gestreutes Laserlicht – erlaubt zudem, simultan zur Partikelgrößenanalyse die Stabilität von Dispersionen und Emulsionen zu untersuchen.

Nanobiotechnologie

Besonders große Bedeutung wird der Einsatz nanotechnologischer Verfahren und Strukturen in überschaubarer Zeit in der Nanobiotechnologie finden.

Die für das Leben entscheidenden Prozesse in der Biologie, z. B. Mustererkennung, Vermehrung, Energieumwandlung und Stoffwechsel, laufen auf nanoskaliger Ebene ab, denn die molekularen Einheiten, die Träger dieser Funktionen (z. B. Polynukleotide und Polypeptide), sind selbst Makromoleküle, deren funktionskritische Abmessungen im Nanometerbereich liegen. Funktionsfähige Einheiten bilden sich aus den genannten Bausteinen durch Selbstorganisation, die auf dem Prinzip der molekularen Erkennung fußt. Fortschreitende Erkenntnis der Bau- und Wirkprinzipien ermöglicht direkte Interaktion mit den biologischen Systemen mit technischen Mitteln, die dann aber notwendigerweise ebenfalls nanoskaligen Aufbau haben müssen. Umgekehrt können aus den biologischen Wirkmechanismen auch neuartige Ansätze für technische Prozesse abgeleitet werden.

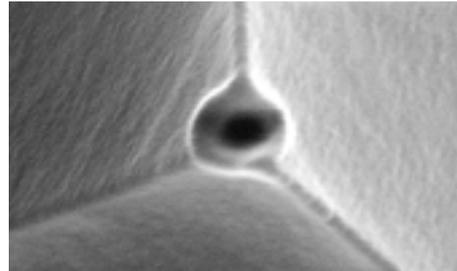


Bild 7

Ein elegantes Beispiel hierzu wird am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB bearbeitet: Hier werden in organische nanoskalige Polymerpartikel bestimmte funktionelle Moleküle eingebunden und anschließend durch Herauslösen wieder entfernt (molekulares Prägen). Die verbleibenden »Fußabdrücke« dieser Moleküle stellen dann hochspezifische Bindestellen für Moleküle der gleichen Art dar. Sie sind so spezifisch, dass sie sogar zwischen Enantiomeren (spiegelbildlichen Formen) desselben Moleküls unterscheiden können. Dünne Schichten aus diesen Nanopartikeln bieten ein hohes Potenzial für biotechnologische Stofftrennung von extremer Trennschärfe.

Flache oder hohlfaserförmige Membranen mit Nanoporesität, die direkt oder nach Funktionalisierung mit den oben genannten oder verwandten Biomolekülen zur Stofftrennung eingesetzt werden können, wurden über keramische Sinterprozesse oder durch Pyrolyse von ORMOCER®-Hohlfasern in einem Forschungsvorhaben der Fraunhofer-Institute für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe IKTS und für Silicatforschung ISC entwickelt. Eine elektrochemische Route zur Erzeugung gerichtet-nanoporöser Membranen wird im Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM bearbeitet.

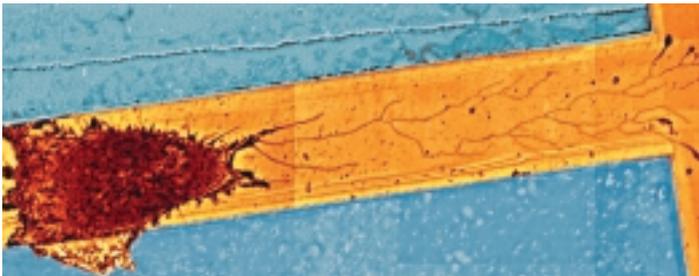


Bild 8

Auch biologische Membran-Proteine können an Nanopartikel gebunden werden. Am Beispiel eines zelltötenden Zytokins konnte das Fraunhofer IGB in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zellbiologie und Immunologie der Universität Stuttgart zeigen, dass die selektive biologische Aktivität dieses Zytokins nach der Anbindung voll erhalten bleibt – was die Aussicht auf neue Medikamente eröffnet, z. B. in der Krebstherapie.

Auch das Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik IBMT setzt in großer Breite Nanotechnologie zur Lösung bioanalytischer und zellbiologischer Aufgaben ein. Besonders eindrucksvoll sind hier die Ansätze zur Charakterisierung lebender Einzelzellen ohne Belastung oder Zerstörung über die Analyse von Zellspuren (Bild 8). Dieses Prinzip ermöglicht beispielsweise die Messung zellphysiologischer Parameter ohne Störung der Zelle selbst. Die Zellspuren bestehen aus etwa 100 Nanometer weiten, dendritisch verzweigten Membranschläuchen.

Ein besonders ambitioniertes und innovatives Themenfeld erschließen gegenwärtig die Fraunhofer-Institute für Biomedizinische Technik IBMT, für Werkstoffmechanik IWM und für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME gemeinsam: Reversible Konformationsänderungen von Forisomen (Pflanzenproteinen), die unter dem Einfluss chemischer (z. B. pH-Wert) und physikalischer (z. B. elektrisches Feld) Größen beobachtet werden, sollen in technischen Nanosystemen genutzt werden. Die Forisome bieten sich hier an, weil sie im Vergleich zu anderen zellulären Aktoren ganz ungewöhnlich robust gegen Umgebungseinflüsse sind. Wenn es gelingt, das molekularbiologische

und biochemische Verhalten der Forisome aufzuklären und rekombinante Forisome im Großmaßstab aufzureinigen, so hätten die beteiligten Institute damit den Schlüssel zur Realisierung einer Fülle neuartiger nanotechnologischer Systeme in der Hand, die von nanofluidischen Ventilen und Weichen für Lab-on-Chip-Systeme über die Manipulation von Biopartikeln, neue Drug-Delivery-Systeme bis hin zu künstlichen Muskeln reichen.

Nanotechnik in der Fraunhofer-Gesellschaft

Besonders das letztgenannte Beispiel macht deutlich, wie die Fraunhofer-Gesellschaft durch Bündelung ihrer natur- und ingenieurwissenschaftlichen Kompetenz, die von der anwendungsorientierten Grundlagenforschung bis zur Realisierung technischer Systeme führt, maßgebende Beiträge zur weiteren Entwicklung der Nanotechnologie liefern kann.

Die Wirtschaftsorientierung ist auch hier Leitlinie des Handelns der Fraunhofer-Institute; sie bildet sich in projektbezogenen Kooperationen mit der gewerblichen Wirtschaft ebenso ab wie in der Gründung neuer Unternehmen. Gegenwärtig ist die Fraunhofer-Gesellschaft als Gesellschafterin an sechs Unternehmen beteiligt, deren primäres Geschäftsfeld in der Nanotechnologie liegt. Die Zahl der Ausgründungen ohne Fraunhofer-Beteiligung liegt noch um ein Mehrfaches höher.

Eine besondere Plattform für den Erfahrungsaustausch und die Kooperation von Forschung und Wirtschaft sind die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ins Leben gerufenen Kompetenzzentren Nanotechnologie. Alle oben genannten Fraunhofer-Institute wirken in einem dieser Zentren mit, im Falle des Kompetenzzentrums Ultradünne Schichten hat das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS die Federführung.

Darüber hinaus ist die Fraunhofer-Gesellschaft dabei, einen Themenverbund Nanotechnologie zu gründen, in dem rund fünfzehn Fraunhofer-Institute mit einschlägigen Kompetenzen koordiniert zusammenarbeiten und Erfahrungen austauschen werden.

Ziel all dieser Aktivitäten ist es, fern von Illusionen und übertriebenen Hoffnungen dem realistischen Entwicklungspotenzial der Nanotechnologie alle Chancen auf Umsetzung und Anwendung zu geben.

Prof. Dr. Gerd Müller ist Leiter des Fraunhofer-Instituts für Silicatiforschung ISC in Würzburg.