

Für zahlreiche technische Anwendungen müssen kondensierte Materialien auf der Nanometerskala gezielt hergestellt und manipuliert werden. Dies bedeutet häufig die Schaffung einer Ordnung mit charakteristischen Längen in der Größenordnung der Ausdehnung einzelner Atome. Neben der Möglichkeit, den Festkörper „Atom für Atom“ mit geeigneten Verfahren aufzubauen, können auch gezielte lokale Umwandlungen durch Energieeintrag modifizierte Strukturen, welche neuartige und technisch nutzbare Eigenschaften aufweisen, hervorbringen.

*For numerous technical applications, condensed materials must be specifically produced and manipulated on the nanometre scale. This frequently means the creation of an order with characteristic lengths in the range of extension of single atoms. Besides the possibility of constructing a solid "atom by atom" with suitable procedures, specific local transformations driven by energy input can also produce modified structures which display new and technically utilisable properties.*

Dirk C. Meyer, Peter Paufler und Wolfgang Pompe

## Strukturelles Design auf der Nanometerskala

### 1 Einleitung

In Materialien im festen Zustand streben Atome eine symmetrische Anordnung in einem Kristallgitter an. In der Natur und in technischen Prozessen entstehen Festkörper zumeist durch die Erstarrung von Schmelzen oder die Ausscheidung aus Lösungen. Durch spezielle Herstellungsverfahren für Nanometermaterialien können kristalline Strukturen hergestellt werden, die sich auf anderem Wege nicht ergeben würden. So ist es zum Beispiel möglich, Atomlage für Atomlage eine synthetische Struktur aufzubauen, den Atomen also gewünschte Positionen zuzuweisen und sie dort über längere Zeiten zu halten. Dies ist ein wichtiger Weg zu Materialien mit neuen technisch nutzbaren Eigenschaften, denn diese Eigenschaften werden ganz wesentlich durch die kristalline Struktur bestimmt. Einige physikalische Effekte treten nur in gezielt modifizierten Nanostrukturen auf. Durch Energieeintrag können die nach den speziellen Verfahren erhaltenen Strukturen im Bereich einiger Nanometer in andere mit modifizierten Eigenschaften umgewandelt werden. Dadurch können beispielsweise Daten gespeichert werden, falls auf diesem Wege eine ferromagnetische Nanostruktur entsteht. Für mechanische Eigenschaften wie Härte und Bruchfestigkeit spielt neben der möglichen Modifizierung der Oberflächen und Kristallstruktur die innere Struktur der Materialien eine entscheidende Rolle. So können nanoskalige Einschlüsse eine Verstärkung der umgebenden Matrix bedingen, aber auch der umgekehrte Fall der Porenbildung beeinflusst diese Eigenschaften drastisch. Während die Entlehnung von Konstruktionskonzepten aus der belebten Natur schon länger ein wichtiges Arbeitsgebiet der Wissenschaft bildet, wurden durch moderne

Analysemethoden in jüngster Zeit interessante Aufschlüsse über die Nanostruktur historischer technischer Erzeugnisse gefunden, deren Eigenschaften seinerzeit empirisch über ausgedehnte Zeiträume optimiert wurden. So können zum Beispiel die Eigenschaften historischer Damaszener Klingen nun im Zusammenhang mit neuerdings gefundenen nanoskaligen Einschlüssen diskutiert werden.

### 2 Strukturbildung auf der Nanometerskala

Strukturierung auf der Nanometerskala bedeutet für die Mehrzahl kondensierter Systeme die Herstellung einer Ordnung mit charakteristischen Längen oberhalb der Größe atomarer Bausteine. Als Grenzfälle unterscheidet man Strukturierungen auf dem Hintergrund atomarer (kristalliner) Fernordnung (Kristallgitter) und solche ohne Fernordnung auf diesem Abstandsniveau. Als Beispiel für den ersten Grenzfall sollen kristalline Strukturen in Nanometerschichten des Systems Eisen-Chrom und deren Umwandlung und für den zweiten Grenzfall nanoporöse Gläser betrachtet werden.

#### 2.1 Kristallstruktur in Fe-Cr-Nanoschichten – Erzeugung und Umwandlung

Moderne Datenspeicher wie die DVD basieren auf der lokalen Änderung physikalischer Eigenschaften, so dem Reflexionsvermögen für Laserstrahlen. Damit kann ein Bereich mit einer Ausdehnung von etwa 10 Mikrometer zum Beispiel die Information „0“ oder „1“ speichern. Auf dem Weg zu noch höheren Speicherdichten wird man auch die Anordnung nur einer handvoll Atome im Gitter nutzen und beeinflussen müssen.

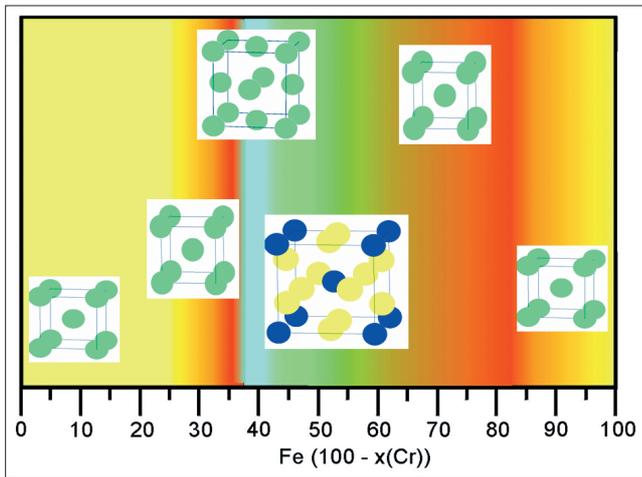


Bild 1. Atomanordnung in den Schichten in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung Fe: Cr in at. % (Ergebnis von Röntgenbeugungsuntersuchungen) [2]. Dargestellt sind Elementarzellen der gefundenen Kristallstrukturen. Bis auf den Bereich um 50 at. %, wo Fe und Cr in einer intermetallischen Verbindung vorliegen, also elementenspezifische Positionen einnehmen, werden durch die Laserablation Mischkristalle verschiedener Kristallsymmetrien gebildet; dort sind die Positionen durch Fe oder Cr mit statistischer Wahrscheinlichkeit entsprechend des relativen Elementgehaltes besetzt.

Aktuell haben die Arbeitsgruppen der Autoren strukturelle Änderungen durch Energieeintrag – etwa durch Laser oder Ionenbeschuss – aufgeklärt, welche Datenspeicher ermöglichen, mit denen beispielsweise die Speicherkapazität einer DVD um das Zehn- bis Hundertfache überboten werden kann. Ziel ist es dabei, die Kristallgitter so verändern zu können, dass sich die relevanten Eigenschaften modifizieren und damit auch verbessern lassen: Die Atome sollen „überredet“ werden, ihre Plätze im Teilchengefüge gezielt zu wechseln, auch wenn sie es eigentlich gar nicht „wollen“.

Eisen (Fe) und Chrom (Cr) bilden offensichtlich ein System mit großem Potenzial auch für die Datenspeicherung. Durch die Methode der Kreuzstrahl-Laserablation

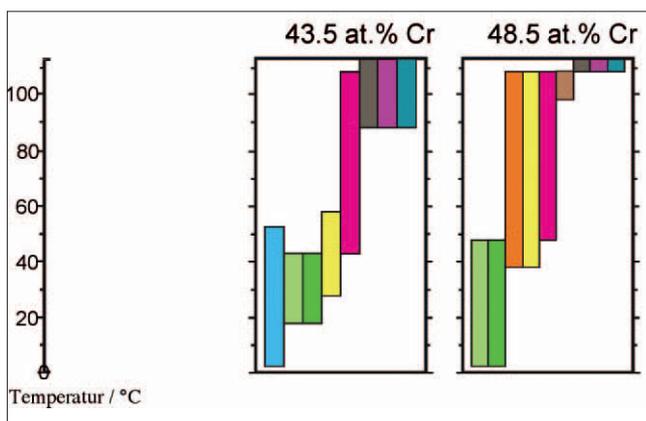


Bild 2. Strukturelle Umwandlungen zweier Fe-Cr-Nanoschichten der oben angegebenen Cr-Gehalte infolge Wärmebehandlung bei den links angegebenen Temperaturen (Dauer 1,5 h). Die Ergebnisse wurden nach Abkühlung auf Raumtemperatur mittels Röntgenstrahlbeugung erhalten. Eine bestimmte Farbe steht für eine spezifische Kristallstruktur. Die gelb markierte Kristallstruktur ist bei Raumtemperatur ferromagnetisch. Adäquate Umwandlungen können lokal, d. h. im Sub-Mikrometerbereich, mittels Laser- oder Ionenbeschuss erhalten werden.

[1] lassen sich Schichten mit Dicken im Nanometerbereich herstellen, wobei 1 nm der Größe von zehn aneinandergereihten Atomen entspricht. Dabei können ganze Scheiben von der Ausdehnung einer DVD homogen beschichtet werden. Eigentlich lassen sich die beiden chemischen Elemente Fe und Cr bei Raumtemperatur und unter normalem Luftdruck nur äußerst begrenzt ineinander mischen. Eine homogene Mischung der Komponenten ist für die Fertigung maßgeschneiderter magnetischer Werkstoffe aber gewünscht: So ist Eisen unter entsprechenden Bedingungen ferromagnetisch, Chrom dagegen anti-ferromagnetisch. Durch die Spezifik der Laser-Ablationsmethode gelang es, zwangsweise gemischte kristalline Schichten in einem weiten Zusammensetzungsbereich herzustellen. Einmal zwangsgemischt, fehlt den Atomen nach der Ablagerung auf einer Unterlage einfach die Energie, um ihre Plätze noch einmal zu wechseln und sich dadurch wieder zu entmischen. Durch Röntgenstrahlbeugung konnten die neuen, in der Natur nicht anzutreffenden Fe-Cr-Kristallstrukturen aufgeklärt werden [2] (Bild 1).

Interessant ist nun die Frage, was passiert, wenn man die Atome dieser Schicht lokal wieder mobil macht, d. h. ihnen Energie zuführt, mit der sie sich aus der Zwangs-Kristallstruktur befreien könnten. Sie werden sich natürlich tendenziell entmischen, können dabei aber günstigere geordnete Zwischenstufen, die ihnen bereits eine Erleichterung aus ihrer Zwangslage verschaffen, durchlaufen. Im vorliegenden Fall wurde mittels Röntgenbeugung beobachtet, dass auf diese Weise Schichten bestimmter Zusammensetzung aus einem nichtmagnetischen in den magnetisch geordneten Zustand übergehen können (Bild 2).

Beschießt man nun eine so gefertigte dünne Schicht Stück für Stück mit energiereicher Laserstrahlung oder mit Ionen (elektrisch nicht neutrale Atome), ordnen sich die Atome der Schicht nur genau an der jeweiligen Stelle neu an – in der Fläche entspricht das nicht mehr als der Ausdehnung einer Handvoll Atome – auf die der Energiestrom gerichtet ist, ähnlich der Situation in einem DVD-Brenner im Computer. Damit können durch die Änderung der Kristallstruktur und die damit verbundenen Eigenschaften auf der Nanometerskala magnetisch geordnete Bereiche zum Beispiel die Information „1“ repräsentieren. Diese Änderungen wurden zuerst durch Röntgenstrahlbeugung nach Erwärmung der Schichten gefunden. Mit einem Atomkraftmikroskop im Magnetkraft-Modus – vergleichbar einem Grammophon mit magnetischer Spitze und atomarer Auflösung – können diese Bereiche durch die magnetische Kraftwirkung abgebildet werden [3, 4] (Bild 3).

## 2.2 Strukturbildung in Gläsern

Die Strukturbildung in Gläsern soll am Beispiel eines Systems der Zusammensetzung  $0,2\text{Na}_2\text{O} \cdot 3,8\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 96\text{SiO}_2$  (mol%) diskutiert werden. Ein ursprünglich kompaktes Glas, d. h. ein Festkörper ohne Fernordnung der atomaren Bausteine, hier aber mit gezielter Zweiphasigkeit, wird dadurch nanostrukturiert, dass die fein verteilte zweite Phase chemisch herausgelöst wird und so Poren zurückbleiben (für Einzelheiten der Herstellung vgl. [5]). Die technische Bedeutung derartiger Gläser ergibt sich aus der besonderen Reaktionsfähigkeit der Poren dieser Größe mit Gasen und Flüssigkeiten [6]. Zugleich werden infolge dieser Behandlung aber Festigkeitseigenschaften durch die Anwesenheit von Poren meist deutlich verringert [7, 8]. Ursache ist die Reaktion von freien Bindungen an Rissspitzen mit Molekülen, die die Poren besetzen. Da diese Reaktion

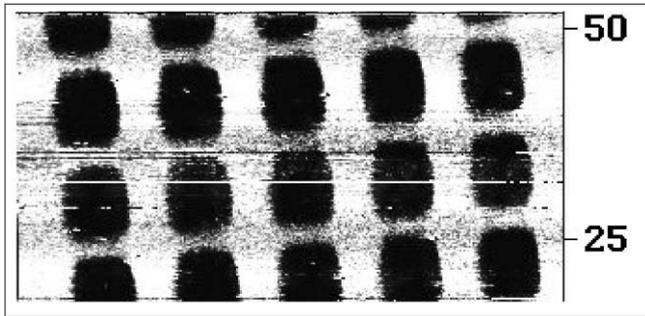


Bild 3. Aufnahme der Oberfläche lokal mit Ionen beschossener  $\text{Fe}_{63}\text{Cr}_{37}$ -Schichten, angefertigt mit einem Atom-Kraftmikroskop im Magnetkraft-Modus. Die dunklen Bereiche entsprechen durch dort erfolgten Ionenbeschuss hervorgebrachten Kristallstrukturen mit magnetischer Ordnung.

ihrerseits die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rissen sowohl erhöhen als auch reduzieren kann, ergibt sich ein interessanter Steuerparameter der mechanischen Eigenschaften über die Porengrößenverteilung und die Spezies der Porenfüllung [7 bis 9]. Die Strukturierung der Gläser muss also zugleich Porengrößenverteilung und Porenfüllung für das jeweilige Anwendungsziel optimieren.

Im vorliegenden Fall des Natriumborosilikatglases sind die Poren durch folgende Parameter charakterisiert: Massendichte  $\rho_{\text{BG}}$  des kompakten Glases (BG) der nominellen Zusammensetzung  $0,2\text{Na}_2\text{O}\cdot 3,8\text{B}_2\text{O}_3\cdot 96\text{SiO}_2$  (mol %)  $\rho_{\text{BG}} = 2,4952(4)\cdot 10^3\text{kg/m}^3$  [10]; Massendichte  $\rho_{\text{NPG}}$  des nanoporösen Glases (NPG) der Zusammensetzung  $8\text{Na}_2\text{O}\cdot 22\text{B}_2\text{O}_3\cdot 70\text{SiO}_2$  (mol %)  $\rho_{\text{NPG}} = 1,3882(7)\cdot 10^3\text{kg/m}^3$  [11] (ermittelt über Auftriebswägung [12]); Anteil der Poren 23,6 Vol.-% (aus Gasdesorptionsmessungen [13]); Porengrößenverteilung mit Maximum bei 5 nm [13]. Wie eine detailliertere Strukturuntersuchung dieser Proben zeigt, existieren in der Glasphase noch Anteile kristalliner Bereiche [11]. Der wesentliche Unterschied im mechanischen Verhalten von kompaktem und porösem Material wird dabei auf die Poren zurückgeführt. Die Härte von NPG ist gegenüber BG um

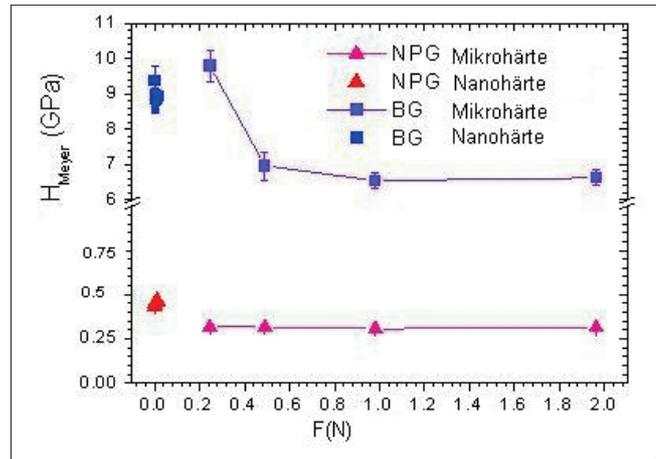


Bild 4. Härte  $H$ , bestimmt durch Mikro- und Nano-Indentierung, von kompaktem (BG) und nanoporösem (NPG) Glas als Funktion der mechanischen Belastung  $F$

mehr als eine Zehnerpotenz niedriger (Bild 4). Eine Messung der Härte kann dabei auch an kleinen Proben durch Mikro- oder Nanohärte-Prüfung erfolgen. Dabei werden definierte Körper mit vorgebbaren Lasten in die Oberflächen der Proben gedrückt und unter anderem das zurückbleibende Eindruckbild bewertet. Unterschiedliche Größen der Eindruckkörper können dabei Verformungsprozesse auf verschiedenen Skalen widerspiegeln. Während aber von Mikro-Härteeindrücken auf BG Risse ausgehen (Bild 5), wurden bei vergleichbarer Belastung (Bild 6) und auch darüber hinausgehend auf NPG keine beobachtet. Offenbar werden Risskeime bereits bei ihrer Entstehung von den Nanoporen entschärft und das Glas ist besser plastisch verformbar.

Die Mechanismen der plastischen Verformung sind für diese Systeme noch nicht gut verstanden. Aus der wesentlichen Verringerung der Härte im Falle der nanoporösen Gläser ist indessen zu schließen, dass das Kollabieren der Poren und die Scherung der Körner geschwindigkeitsbestimmende Mechanismen sein sollten. In der plastischen

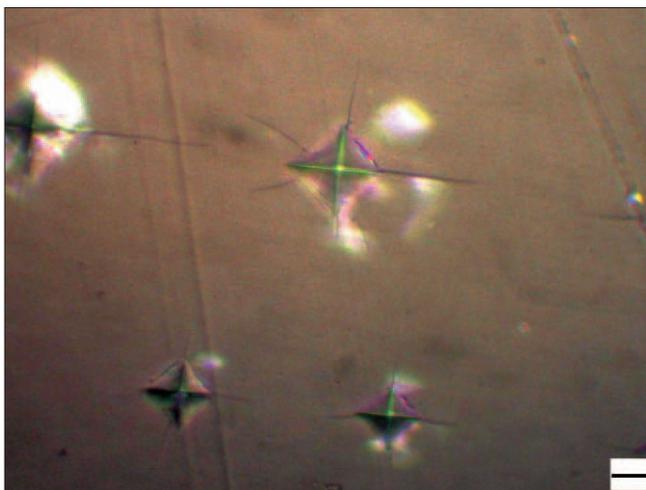


Bild 5. Polarisationsmikroskopisches Bild im Aufricht von Mikrohärtedruckeindrücken auf kompaktem Glas (Maßstab entspricht 10  $\mu\text{m}$ ). Die größten und kleineren Eindrücke (obere bzw. untere Reihe) wurden mit Lasten von 1,962 N bzw. 0,981 N erzeugt. Radiale and tangentiale Risse sind bei höheren Lasten sichtbar.

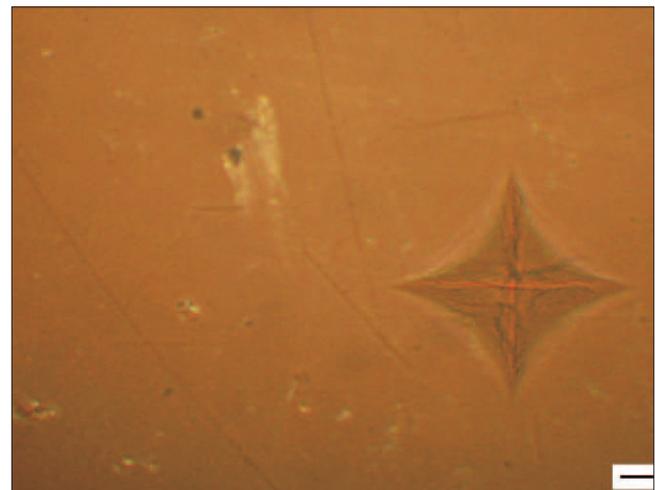


Bild 6. Vergleichbar mit Bild 5, jedoch auf nanoporösem Glas (Maßstab entspricht 20  $\mu\text{m}$ ). Der Eindruck wurde mit der höheren Last von 1,962 N erzeugt. Im Unterschied zur Situation in Bild 5 zeigen diese Eindrücke keine Risse.

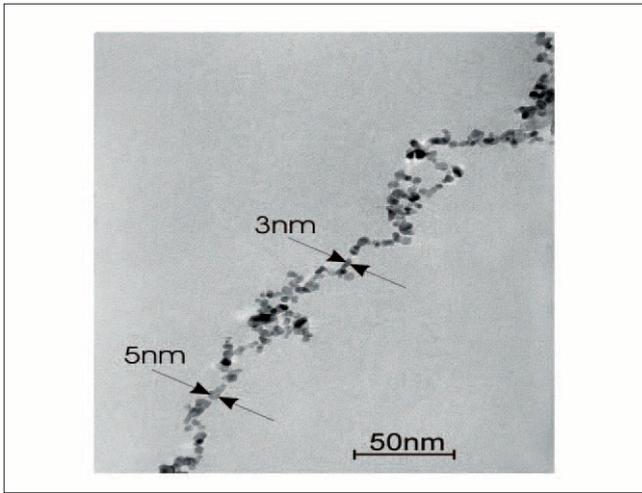


Bild 7. Eine kontinuierliche Kette von Pt-Clustern, die auf einer  $\lambda$ -DNA abgeschieden worden sind [23], dargestellt mittels Transmissions-Elektronen-Mikroskopie (TEM)

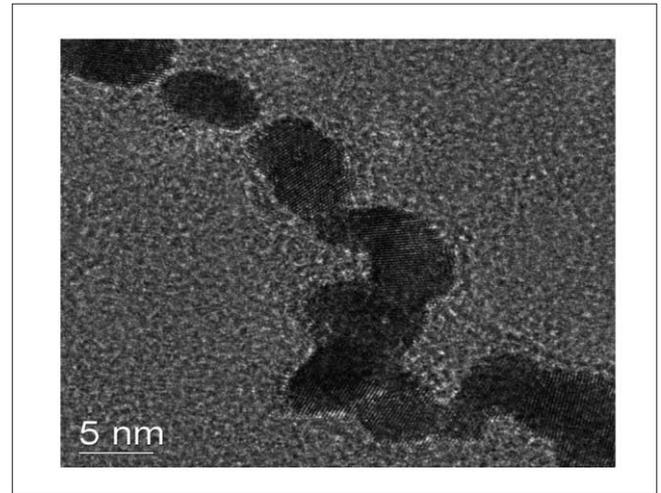


Bild 8. Hochauflösende TEM-Abbildung der Pt-Cluster aus Bild 7. Erkennbar ist, wie einzelne Cluster zu einem kleinen Nanodraht mit einem Durchmesser von etwa 5 nm zusammengewachsen sind.

Zone nahe den Härteeindrücken sind die Materialflüsse weniger eingeschränkt als im kompakten Material. Nach [14] erreicht die Härte  $H$  bei Porendichten kleiner als  $\sim 30\%$  die kritische Spannung des Kollabierens einer Pore, im vorliegenden Fall  $0,3 - 0,5$  GPa. Für kompaktes Material erwartet man als Fließspannung  $\sigma_F = 3H \approx 1$  GPa [15]. Auch ein weiterer wichtiger Parameter, der reduzierte Young'sche Modul  $E_r$ , hat durch die Existenz der Poren eine dramatische Verringerung erfahren [11], was qualitativ mit Modellen von [14, 16] übereinstimmt.

### 3 Zeugnisse frühzeitiger Nanostrukturierung – Damaszener Klingen

Durch Untersuchungen des Gefüges von Damaszener Klingen aus dem 17. Jahrhundert zusammen mit archäometallurgischen Erkenntnissen aus rund 2 000 Jahren Sonderstahlerzeugung dieser Kategorie ist kürzlich auf historische Vorbilder einer Nanostrukturierung von Werkstoffen aufmerksam gemacht worden, die allerdings von unseren Vorfahren ohne Kenntnis dieses Begriffs offenbar auf empirischem Wege erreicht worden ist. Es handelt sich um überwiegend drahtförmige Gefügebestandteile aus Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) von 10 bis 20 Nanometern Durchmesser und einigen Hundert Nanometern Länge [17 bis 19]. In [20] wurden Ergebnisse der Untersuchung mittels eines Transmissions-elektronenmikroskops im Hochauflösungsmodus als möglicher zusätzlicher Einbau von Kohlenstoffnanoröhren interpretiert. Diese offensichtlich vorliegende Nanostrukturierung hat Folgen für die mechanischen Eigenschaften der Klingen. Demnach stellen diese Klingen nach moderner Klassifizierung komplexe Kompositmaterialien mit nanoskopischen Bestandteilen dar.

### 4 Strukturbildung auf sich selbstorganisierenden Nanotemplaten

Zusätzlich zu den Verfahren, bei denen Festkörperreaktionen zum Aufbau von Nanostrukturen genutzt werden, bieten auch Selbstorganisationsmechanismen der sogenannten „weichen“ Materie (soft matter) einen aussichtsreichen

Ansatzpunkt zum Aufbau von Festkörpernanostrukturen. Als Grundidee wird dabei der Gedanke verfolgt, in der „weichen“ Materie ein Templat vorzuprägen, in das dann die Festkörpernanostruktur eingeschrieben werden kann. Ein einfaches Beispiel dafür ist die Abscheidung von Nanoclustern in Vesikeln oder Mizellen, wobei die Vesikel oder Mizellen als hohlkugelförmige Anordnungen von amphiphilen Polymeren in einem geeigneten Lösungsmittel eine Art von Mikroreaktor für das Clusterwachstum bilden. Einen wesentlich höheren Organisationsgrad solcher „weichen“ Nanotemplate kann man in biomolekularen Materialien finden. Ein Beispiel dafür sind die in dem Beitrag von GERHARD RÖDEL et al. behandelten bakteriellen Proteinmembranen [21], die zur Erzeugung von periodischen Anordnungen von Metallclustern oder von Nanodrähten genutzt werden können. Für die Erzeugung von kettenförmigen Anordnungen solcher Cluster bieten sich einzelne doppelsträngige DNA-Moleküle und daraus aufbaubare DNA-Netzwerke an [22, 23]. Ein Vorzug der DNA sind dabei die zusätzlich nutzbaren Erkennungsmechanismen durch die Auswahl geeigneter komplementärer Kombinationen der DNA-Basen. Bisher erfolgt bei dieser Art der Erzeugung von artifiziellen Nanostrukturen die Abscheidung der anorganischen Strukturen im wässrigen Medium unter Mitwirkung von zusätzlichen Reduktionsmitteln. Es ist zu erwarten, dass zukünftig auch die oben besprochene Möglichkeit eines zusätzlichen kontrollierten Energieeintrages durch Strahlung (Elektronen, Licht oder Röntgenstrahlung) die Steuerung des Wachstums der Nanostrukturen weiter verbessern wird. Dies wird die Akzeptanz dieser Verfahren für eine technische Umsetzung wesentlich vergrößern (Bilder 7 und 8).

### Literatur

- [1] Tselev, A.; Gorbunov, A.; Pompe, W.: In: Rev. Sci. Instrum. **72** (2001), S. 2665 – 2672
- [2] Levin, A. A.; Meyer, D. C.; Gorbunov, A.; Tselev, A.; Pompe, W.; Paufler, P.: In: J. Alloys Compd. **347** (2002), S. 171 – 177
- [3] Gorbunov, A.; Levin, A. A.; Wieser, E.; Bischoff, L.; Eckert, D.; Mensch, A.; Mertig, M.; Meyer, D. C.; Reuther, H.; Paufler, P.; Pompe, W.: In: Proc. SPIE **5121** (2002), S. 306 – 316
- [4] Wieser, E.; Reuther, H.; Prokert, F.; Gorbunov, A.; Tselev, A.; Pompe, W.; Levin, A. A.; Meyer, D. C.; Paufler, P.: In: J. Appl. Phys. **92** (2002), S. 572 – 577

- [5] *Antropova, T. V.*: In: *Optica Applicata* **24** (1994) 3, S. 131 – 140  
 [6] *Davis, M. E.*: In: *Nature* **417** (2002), S. 813 – 821  
 [7] *Guyer, E. P.; Dauskardt, R. H.*: In: *Nature Materials* **3** (2004), S. 53 – 57  
 [8] *Cook, R.*: In: *Nature Materials* **3** (2004), S. 15 – 16  
 [9] *Maidenberg, D. A.; Volksen, W.; Miller, R. D.; Dauskardt, R. H.*: In: *Nature Materials* **3** (2004), S. 464 – 469  
 [10] *Hübner, R.* Diplomarbeit. TU Dresden, Institut für Kristallographie und Festkörperphysik, 2000  
 [11] *Paufler, P.; Filatov, S. K.; Shakhverdova, I. P.; Bubnova, R. S.; Reibold, M.; Müller, B.; Levin, A. A.; Meyer, D. C.*: In: *Glass Phys. Chem.* (2007) (im Druck)  
 [12] *Wolf, B.*: In: *Rev. Sci. Instr.* **66** (1995), S. 2578 – 2581  
 [13] *Kreisberg, V. A.; Rakcheev, V. P.; Antropova, T. V.*: In: *J. Porous Mater.* **12** (2005), S. 13 – 22  
 [14] *Ramakrishnan, N.; Arunachalam, V. S.*: In: *J. Mater. Sci.* **25** (1990), S. 3930 – 3937  
 [15] *Hencky, H.*: In: *Z. Angew. Math. Mech.* **3** (1923), S. 241 – 251  
 [16] *Wang, J. C.*: In: *J. Mater. Sci.* **19** (1984), S. 801 – 808  
 [17] *Kochmann, W.; Reibold, M.; Goldberg, R.; Hauffe, W.; Levin, A. A.; Meyer, D. C.; Stephan, Th.; Müller, H.; Belger, A.; Paufler, P.*: In: *J. Alloys & Comp.* **372** (2004) L15 – L19  
 [18] *Levin, A. A.; Meyer, D. C.; Reibold, M.; Kochmann, W.; Pätzke, N.; Paufler, P.*: In: *Cryst. Res. Technol.* **40** (2005), S. 905 – 916  
 [19] *Reibold, M.; Levin, A. A.; Meyer, D. C.; Paufler, P.; Kochmann, W.*: In: *Int. J. Mat. Res.* **97** (2006), S. 1172 – 1182  
 [20] *Reibold, M.; Paufler, P.; Levin, A. A.; Kochmann, W.; Pätzke, N.; Meyer, D. C.*: In: *Nature* **444** (2006), S. 286  
 [21] *Rödel, G.; Blecha, A.; Mertig, M.; Pompe, W.*: In: *Wiss. Z. TU Dresden* **56** (2007) 1 – 2, S. 131 – 135  
 [22] *Mertig, M.; Pompe, W.; Niemeyer, C. M.; Mirkin, C. A.* (Hrsg.): *Nanobiotechnology – Concepts, Applications and Perspectives*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. S. 256 – 277  
 [23] *Mertig, M.; Colombi Ciacchi, L.; Seidel, R.; Pompe, W.; de Vita, A.*: In: *Nano Letters* **2** (2002), S. 841 – 844

Manuskripteingang: 9.1.2007

Angenommen am: 17.1.2007



### Meyer, Dirk C.

Dr. rer. nat.

Studium Physik von 1986 bis 1991 an der TU Dresden ♦ 2000 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 2004 Leiter der „Selbstständigen Nachwuchsgruppe Nanostrukturphysik“/Juniorprofessor am Institut für Strukturphysik, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden



### Paufler, Peter

Prof. Dr. rer. nat. habil., Dr. h. c.

Studium Physik von 1958 bis 1963 an der TH/TU Dresden ♦ 1967 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1971 Habilitation zum Dr. sc. nat. (Dr. rer. nat. habil.) ♦ von 1978 bis 1992 Professor für Kristallographie an der Universität Leipzig ♦ von 1992 bis 2005 Professor für Kristallographie am Institut für Strukturphysik, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden ♦ von 2005 bis 2006 Vertretung der Professur für Strukturphysik ♦ seit 2006 Prof. i. R., Angehöriger der TU Dresden am Institut für Strukturphysik, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden



### Pompe, Wolfgang

Prof. Dr. rer. nat. habil.

Studium Physik von 1960 bis 1965 an der TU Dresden ♦ 1967 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1974 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ von 1977 bis 1990 Professor für Festkörperphysik an der Akademie der Wissenschaften der DDR ♦ seit 1996 Professor für Materialwissenschaft und Nanotechnik am Institut für Werkstoffwissenschaft, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden