



3/2002

# nanomat

Netzwerk  
Nanomaterialien

Geschäftsstelle

Forschungszentrum  
Karlsruhe GmbH

Postfach 36 40  
D-76021 KARLSRUHE

Geschäftsführerin  
Dr. Regine Hedderich  
Telefon: (0 72 47) 82 - 26 30  
Telefax: (0 72 47) 82 - 64 20  
e-mail: regine.hedderich@int.fzk.de

www.nanomat.de  
www.kompetenznetze.de

## Nanotechnologie – Chance oder Risiko?

In der Frühphase der Entwicklung der Nanotechnologie sind die Gestaltungsmöglichkeiten für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik am größten. Lösungspotenziale der Nanotechnologie bezüglich erkennbarer Nachhaltigkeitsprobleme verfolgen wir mit unserer Interessenbekundung für ein Exzellenznetzwerk „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ im 6. Rahmenprogramm der EU. Ob Nanopartikeln in lebenden Organismen neuartige ökologische und gesundheitliche Risiken verursachen, untersuchen die Wissen-

schaftler des Instituts für Toxikologie und Genetik des Forschungszentrums Karlsruhe. Lesen Sie dazu auch die Glosse von Dennis Hickethier.

Um das große Potenzial der Vielfachschichten für Röntgendiffraktometrie, Röntgenspektroskopie und Freie-Elektronen-Laser geht es im Artikel von Michael Störmer vom Forschungszentrum GKSS, Geesthacht.

Herzlichst Regine Hedderich

## Die öffentliche Meinung als Regulativ

Mittlerweile, also nach erfolgreicher Ankunft im 21. Jahrhundert, ganz ohne die vorhergesagten Weltuntergangsszenarien auch nur halbwegs erleben zu dürfen, wird eines immer deutlicher: Die Frage des „guten“, in Fragen der Ethik hinreichend gefestigten Wissenschaftlers, lautet jetzt erst Recht, „Was wollen wir?“ und nicht „Was könnten wir?“.

Neben der sich unter anderem mit dem menschlichen Erbgut, der „Klontechnik“ und Genmanipulation beschäftigenden Biowissenschaft wird die Nanowissenschaft argwöhnigst beäugt. Da ist die Rede von kleinsten Maschinenwesen, die, nachdem sie keine Lust mehr haben, durch verkalkte Adern zu schwirren und hie und da die zu ansehnlichen Krusten gewordenen Lagen von Cholesterin und Nikotin abzuspachteln, sich plötzlich zusammenrotten, um die Menschen samt und sonders von „ihrem“ Planeten zu tilgen. Und da hört man von einem Computer, der wohl im Jahre 2030 die gesamte „neuronale Leistungskraft“ der Bürger der Vereinigten Staaten an Rechenkraft besitzen würde – für 1000 Dollar das Stück. Und dann klopfen – mittlerweile recht penetrant – auch noch Gerüchte um „die Maschine mit Bewusstsein“ an die Tür, um Einlass in den Raum der schwermütigen Bedenken zu erlangen.

Der gemeine „Nanologe“ gehört dementsprechend beobachtet, im Vorhinein allerdings bleibt zu erkunden, was denn überhaupt an „Gutem“ und „Schlechtem“ aus diesem und jenen Forschungsansatz werden könnte. Das Stichwort hierzu lautet Technikfolgenabschätzung.

Studien, die in diesem Bereich erarbeitet werden, entscheiden letztlich darüber, was wir zwar könnten, aber eben nicht wollen, oder was wir können und wollen, oder was wir noch nicht können und auf keinen Fall wollen usw. Dies mit gutem Grund natürlich, denn stellen Sie sich mal vor, was eine Palette Sonnenlotion, in der kleine böse Maschinen wohnen, z. B. in den Händen von Finsterlingen mit Weltruf anrichten könnten – dem nichts ahnenden GI beim nächsten Dessert Storm an der Oase vor Bagdad gereicht ... ich möchte es nicht zu Ende denken.

Kommen wir von der Fiktion zur Wirklichkeit: Ich habe mich mit Herrn Dr. Thorsten Fleischer vom Institut für Technikfolgenabschätzung (ITAS) am Forschungszentrum Karlsruhe getroffen, und mich mit ihm über Nanotechnologie und -Wissenschaft im Lichte der Technikfolgenabschätzung unterhalten.

## Technikfolgenabschätzung ...

... kann als einer der schwer eindeutig zu definierenden Begriffe gelten: Prof. Dr. A. Grunwald, Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung, schreibt in seinem Buch *Technikfolgenabschätzung – eine Einführung*: „Unter Technikfolgenabschätzung werden wissenschaftliche und kommunikative Beiträge zur Lösung technikbezogener gesellschaftlicher Probleme verstanden.“ Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag vertritt die Auffassung, dass „... das vorausschauende Abwägen von Chancen und Risiken und [...] die Gestaltung neuer technischer Entwicklungen und ihrer Rahmenbedingungen“ als Technikfolgenabschätzung zu bezeichnen ist.

Das BMBF meint – als ein wesentlicher Auftraggeber für Studien zur Technikfolgenabschätzung –, dass die Nanotechnologie Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft innerhalb der nächsten 20 Jahre wesentlich verändern könne und schlussfolgert daraus, dass die frühzeitige Bewertung und Prognose aller Chancen und Risiken notwendig sei. Um sich bei der Bewertung der Bedeutung der Nanotechnologie unterstützen zu lassen, hat das BMBF drei Dienstleistungsaufträge zu den Chancen und Risiken der Nanotechnologie ausgeschrieben. Die Studien sollen das „Wirtschaftliche Potenzial der Nanotechnologie“, „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“ sowie den Bereich „Nanotechnologie und Gesundheit“ erkunden.

Das ITAS am Forschungszentrum Karlsruhe wirkt an einem im November 2001 begonnenen Projekt mit, das unter anderem klären soll, wie sich der Begriff „Nanotechnologie“ charakterisieren lässt; welche Entwicklungen in Forschung und Anwendung zu erwarten sind; welche gesellschaftlichen, ökologischen und gesundheitlichen Risiken zu bedenken sind; ob die Nanotechnologie Beiträge zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten kann und schließlich, welche Rahmenbedingungen zur Förderung sinnvoller Anwendungen nötig sind.

Um dies zu erreichen, werden wissenschaftliche und technische Grundlagen sowie absehbare Entwicklungstendenzen des Themenfeldes überblicksartig zusammengestellt, wobei Fragen der Definition, Eingrenzung und Abschätzung der zu erwartenden Anwendungspotenziale von „Nano-Produkten und -Verfahren“ im Mittelpunkt des Interesses stehen, berichtete Dr. Fleischer. Hinzu kommen ausgewählte Aspekte zu Auswirkungen der Nanotechnologie auf Wirtschaft, Umwelt und Gesundheit. Darauf aufbauend erfolgt eine vertiefende Diskussion ausgewählter Anwendungsfelder, führte Dr. Fleischer weiter aus.

Die Nanotechnologie ist erst kürzlich auf die Liste der Technologien gesetzt worden, deren Technikfolgen abzuschätzen sind. Dementsprechend existieren im Moment keine Ergebnisse, die über die Resultate von im Bereich Nanotechnologie tätigen Unternehmen in Auftrag gegebenen Studien – z. B. zu Nanopartikeln und deren Wirkung auf den menschlichen Organismus – hinausgehen.

Dennis Hickethier

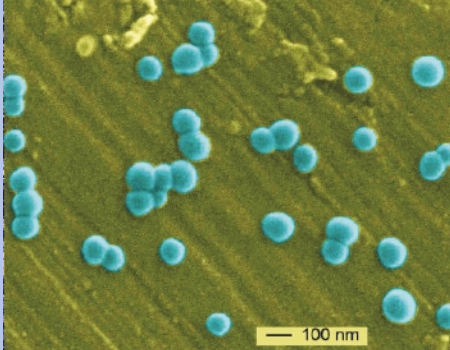


Abbildung 1: Darstellung von ultrafeinen Silicasol-Partikeln, mittlerer Durchmesser 60 nm im Raster-Elektronenmikroskop. Die kleineren Silicasolpartikel sind toxischer als die großen. Hämatit im gleichen Größenbereich ist dagegen praktisch untoxisch.

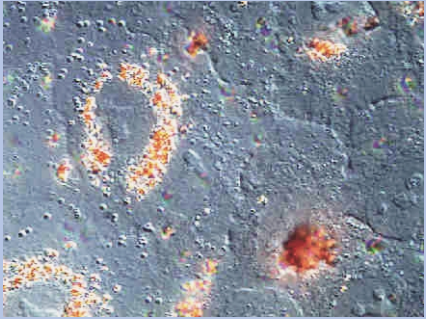


Abbildung 2: Epithelzellen nach Endozytose von Hämatitpartikeln. Die Hämatitpartikel sind erst nach Aggregation innerhalb der Zellen (rot) zu erkennen. (630fache Vergrößerung, Ölimmersion, DIC.)

Feine und ultrafeine Umweltstäube sind aufgrund von epidemiologischen Studien als Verursacher einer erhöhten Morbidität und Mortalität in der Bevölkerung in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen gelangt. Mit Hilfe von in vitro Tests wurde gezeigt, dass ultrafeine synthetische Partikel stärker zytotoxisch wirken als größere Partikel gleicher chemischer Zusammensetzung. Flugstaub aus einer Hausmüllverbrennungsanlage, der auch Partikel im Nanometer-Bereich enthält, bewirkt in Lipopolysaccharid-stimulierten Makrophagen eine verstärkte Freisetzung proinflammatorischer Zytokine sowie eine Inhibierung der Bildung des NO-Radikals. In Kokulturen aus Makrophagen und Lungenepithelzellen wurde gezeigt, dass diese mehr Zytokine freisetzen als die Summe der entsprechenden Einzelzellkulturen. Die Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass erhöhte Schwebstaubkonzentrationen bei besonders empfindlichen Personen (z.B. an einer chronischen Bronchitis oder Lungenerkrankung Erkrankte) zu einer Verschlimmerung der bestehenden Erkrankung führen, indem das empfindliche Netz der Abwehrreaktionen gestört wird.

S. Diabaté, K. Völkel, R. Wottrich, ITG

Zu NanoMat gehören folgende Partner:

- Degussa AG;
- Forschungszentrum Jülich GmbH;
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH;
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung;
- Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe;
- Fraunhofer-Institut für Silicatforschung;
- GKSS Forschungszentrum GmbH;
- Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden;
- Max-Planck-Institut für Metallforschung;
- Merck KGaA;
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen;
- Robert Bosch GmbH;
- SusTech GmbH & Co. KG;
- Technische Universität Darmstadt;
- Technische Universität Hamburg-Harburg;
- Unipress Warschau;
- Universität Bremen;
- Universität Duisburg;
- Universität Gesamthochschule Essen;
- Universität Karlsruhe (TH);
- Universität Konstanz;
- Universität des Saarlandes;
- Universität Stuttgart;
- Universität Ulm

# Röntgenspiegel – Nanooptiken für harte und weiche Röntgenstrahlung

## Überblick

Mittels neuartiger Sputtertechnologie werden nanoskalige Vielfachschichten für innovative röntgenoptische Anwendungen am GKSS-Forschungszentrum entwickelt. Diese können insbesondere als periodisch gestapelte Metall-/Nichtmetallschichten mit einer Einzelschichtdicke von einigen Nanometern zur Ablenkung der Röntgenstrahlen und als „Filter“ zur Monochromatisierung angewendet werden. Ihr Einsatzgebiet finden die nanoskaligen Vielfachschichten in der Röntgendiffraktometrie, Röntgenfluoreszenzspektrometrie und zukünftig am Freien-Elektronen-Laser.

## Einführung

Anfang der 90er Jahre wurden erstmals bei GKSS neuartige Sputterquellen mit der Ultrahochvakuum-Technologie kombiniert, um dünne Schichten und Vielfachschichten sehr hoher Reinheit, genauer Stöchiometrie und Dickenpräzision reproduzierbar herzustellen. Die wissenschaftlichen Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf die Bildung metastabiler und instabiler Phasen während der Beschichtung bzw. während einer anschließenden thermisch induzierten Phasenreaktion, insbesondere an synthetischen Grenzflächen. Ziel war es, die Bildung der metastabilen Phasen vorherzusagen sowie die thermodynamische Reaktionskinetik zu modellieren und quantitativ zu beschreiben. Unterstützt wurden die Untersuchungen durch die Modellierung der thermodynamischen Funktionen, eine der Kernkompetenzen der GKSS.

Auf der Basis dieser Grundlagenuntersuchungen und durch eine innovative Modifikation der bei GKSS entwickelten Beschichtungstechnik gelang es der GKSS 1995, nanostrukturierte Vielfachschichten für röntgenoptische Anwendungen mit wettbewerbsfähiger Qualität herzustellen. Die schnelle Umsetzung der neuartigen Technologie erforderte eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Beschichtungstechnikern, Werkstoffwissenschaftlern, Experten für Strahlenoptik sowie Numerikern, die die Beugungseigenschaften von nanostrukturierten Vielfachschichten quantitativ modellierten. Schon früh wurden Verbindungen zur Anwenderindustrie aufgenommen: Zusammen mit Siemens (München) und Bruker-AXS (Karlsruhe) wurden neue Produkte für die Röntgendiffraktometrie entwickelt, die sich durch bessere thermische Stabilität auszeichnen bzw. die für spezielle Röntgenquellen geeignet sind. Da die bei GKSS entwickelte Beschichtungstechnik sich für die Präparation einer Vielzahl von unterschiedlichen Materialkombinationen eignet, konnten bei der Prototypenherstellung auch dezidierte kundenspezifische Anforderungen berücksichtigt werden.

Neben der Nutzung von Röntgenspiegeln bei Röntgendiffraktometern eröffnen sich auch Anwendungen in der Röntgenanalytik. In Zusammenarbeit mit dem (damaligen) Institut für Physikalische und Chemische Analytik (IPCA) der GKSS wurden spezielle Röntgenspiegel für die dort entwickelte TRFA (Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse) hergestellt und erfolgreich getestet. Die Firma Atomika (Oberschleißheim), die derartige Geräte kommerziell herstellt und vertreibt, verwendet inzwischen die bei GKSS entwickelten Röntgenspiegel, um die Nachweisgrenze der analytischen Geräte, die bevorzugt in der Umwelttechnik und Werkstoffentwicklung eingesetzt werden, deutlich zu verbessern.

Seit 1999 werden die Kompetenzen der GKSS für die Herstellung von Röntgenoptiken auch im Rahmen eines Strategiefondsprojektes der Helmholtz-Gemeinschaft genutzt, das zusammen mit dem DESY (Hamburg) bearbeitet wird. Die Kooperation mit DESY ist für GKSS von besonderer strategischer Bedeutung, zum einen in Hinblick auf die Entwicklung eines Freien-Elektronen-Lasers, zum anderen im Hinblick auf die Nutzung der hochintensiven Synchrotronstrahlung für werkstoffwissenschaftliche Forschungs- und Technologieentwicklungen.

Die erfolgreichen technologischen Entwicklungen führten im Frühjahr 2002 zur Gründung der Firma Incoatec (Kontakt: <http://www.incoatec.de>) durch Mitarbeiter der GKSS.

## Vielfachschichten für röntgendiffraktometrische Anwendungen

Die Entwicklungen konzentrierten sich zunächst auf den sogenannten Göbelspiegel (Abb. 1). Mit diesem Spiegel kann das divergente, polychromatische Licht einer Röntgenröhre durch eindimensionale Kollimation zu einem monochromatischen Parallelstrahl umgeformt werden. Dazu ist es erforderlich, dass die Schichtdicken entlang des Spiegels in sehr definierter Weise mit zunehmendem Röhrenabstand zunehmen (Gradienten-Vielfachschicht), so dass die Variation des Einfallswinkels auf den Spiegel gemäß der Braggbeziehung durch eine Variation der Schichtdicken exakt kompensiert wird. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Beschichtung sind extrem hoch: Die lokalen Schichtdickenfehler dürfen einen Atomdurchmesser nicht überschreiten, und die mittleren Fehler des

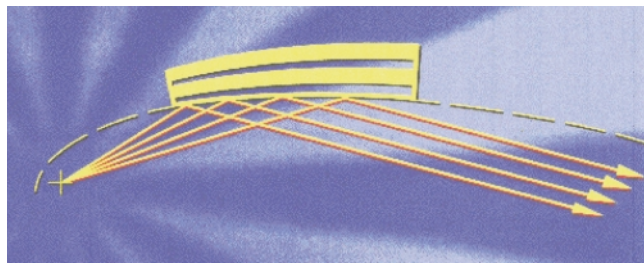


Abb. 1: Parallelstrahl-Göbelspiegel.

Schichtdickenverlaufs entlang des Spiegels dürfen 1/10 Atomdurchmesser nicht überschreiten.

Mit dem Ziel, qualitativ besonders hochwertige Spiegel zu fertigen, ist GKSS bezüglich der Beschichtungs- wie auch der Formgebungstechnik von Anfang an neue Wege gegangen. So wurden die Anforderungen an die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Beschichtung wesentlich verbessert. Diese hohe Qualität wird besonders wirksam in anspruchsvollen Diffraktometerkonfigurationen, wie etwa bei – mit kristallinen Monochromatoren ausgestatteten – Hochauflösungsdiffraktometern. GKSS hält, gemeinsam mit den Herren Schuster und Göbel (Siemens, München), das Patent an diesem Spiegel.

Eine weitere Patentanmeldung, die auf die Verbesserung der Langzeitstabilität der Spiegel zielt, wurde kürzlich eingereicht. Ferner führten die Entwicklungen bei GKSS zur Erhöhung der spektralen Reinheit und damit zu optimierten Spiegeln für harte Röntgenstrahlung. Auf dem Gebiet der Göbelspiegel ist auch das Fraunhofer-Institut IWS in Dresden aktiv, das mit der Methode der gepulsten Laserdeposition dünne Schichten herstellt.

## Vielfachschichten für röntgenspektrometrische Anwendungen

Parallel zu den Entwicklungen von Göbelspiegeln für die Röntgendiffraktometrie wurde mit der Entwicklung von Vielfachschichten für weiche Röntgenstrahlung begonnen. So wurde gemeinsam mit dem (damaligen) Institut für Physikalische und Chemische Analytik der GKSS und der Firma Philips (Eindhoven und Almelo) ein EU-Projekt im Rahmen des MEDEA-Programms bearbeitet, in dem spezielle Nachweisdetektoren für leichte Elemente mit den extrem hohen Empfindlichkeiten entwickelt wurden. Diese Analysatoren, die in der Halbleiterindustrie zur on-line Prozesskontrolle eingesetzt werden sollen, müssen die Fluoreszenzstrahlung kleinster Mengen leichter Elemente (Al, Mg, C, B) in Anwesenheit sehr intensiver, störender Si-Strahlung noch signifikant erfassen können. Besonders kritisch sind die Elemente Al und B, deren K-Emissionslinien unmittelbar neben den Si-K- bzw. Si-L-Linien liegen. Für den Nachweis dieser beiden Elemente wurden neue Vielfachschichten entwickelt

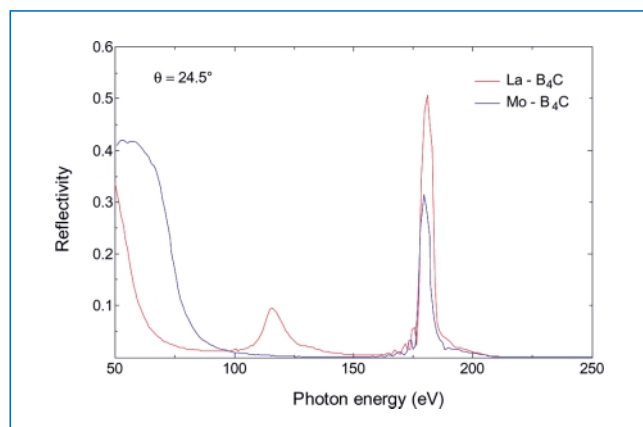


Abb. 2: Röntgenreflektivität einer La/B<sub>4</sub>C-Vielfachschicht mit 8 nm Periode in Abhängigkeit von der Energie bei festem Winkel von 24,5°, verglichen mit einer bisher bei dieser Energie verwendeten Schicht Mo/B<sub>4</sub>C. Die Energie von 183 eV entspricht der Bor-K-Linie. Die Messung wurde mit s-polarisierter Strahlung am Reflektometer/HASYLAB durchgeführt.

und erfolgreich getestet, u.a. am XUV-Reflektometer des HASYLAB am DESY, Hamburg (Abb. 2). Die Messungen zeigen, dass die Reflektivität des neuen La/B<sub>4</sub>C-Analysators bei 183 eV (Bor) fast doppelt so viel Intensität liefert, wie der beste bisher verwendete Mo/B<sub>4</sub>C-Analysator. Hinzu kommt die niedrigere Reflektivität des neuen Reflektors bei Energien unterhalb 100 eV, die zu einer verbesserten Untergrundunterdrückung insbesondere der Si-L-Linien um 90 eV führt. Diese Ergebnisse wurden in den anvisierten Laboranalytikinstrumenten glänzend bestätigt und führten zu einer weiteren Patentanmeldung.

## Röntgenoptiken für den Freien-Elektronen-Laser (FEL)

Im Rahmen eines HGF-Strategiefondsprojekts zum Aufbau einer „seeding option“ für einen Röntgen-FEL am DESY (TESLA-Projekt) entwickelt GKSS Dünnschicht-Röntgenoptiken, die der extremen Wärmelast des FEL standhalten. Die „seeding option“ ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. In einem ersten Undulator startet das Lasing aus dem Rauschen. In dem folgenden Monochromator werden die Elektronen und die Photonen getrennt, das Röntgenlicht wird monochromatisiert und danach wieder phasenrichtig in den fol-

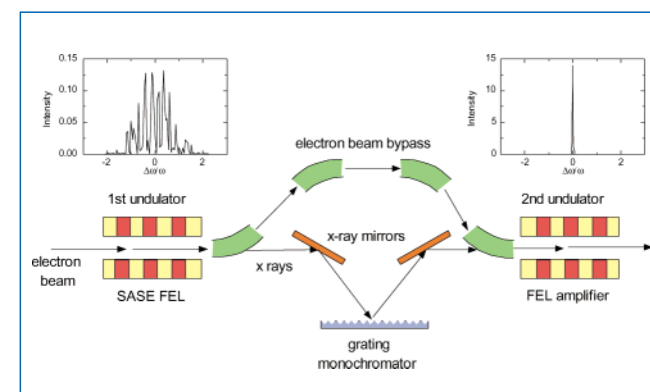


Abb. 3: Seeding option für den FEL.

genden Undulator eingespeist. Dort wird der Laser mit dem nun monochromatischen Licht bis in die Sättigung weitergepumpt, so dass man vollständige zeitliche Kohärenz erreicht. Zum Umlenken des Röntgenlichtes auf den Gittermonochromator sollen die GKSS-Spiegel eingesetzt werden. Bei den Spiegeln handelt es sich nicht um Vielfachschichten, sondern um Einzelschichten, die in streifenförmigem Einfall (Totalreflexion) betrieben werden. Aus Gründen niedriger Absorption und damit niedriger Wärmelast stehen Kohlenstoffschichten im Vordergrund des Interesses.

Der im HGF-Strategiefondsbeitrag angestrebte Energiebereich erstreckt sich bis 200 eV. Abb. 4 zeigt – in guter Übereinstimmung mit theoretischen Berechnungen –, dass die Reflektivität der GKSS-Schicht im relevanten Energiebereich unterhalb von 200 eV größer als 90% ist.

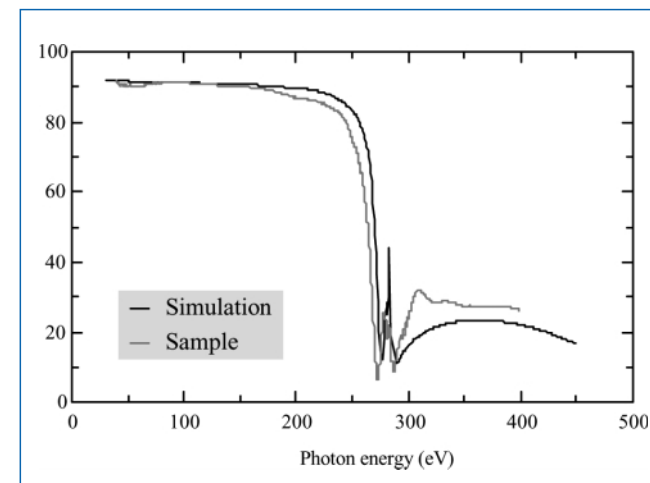


Abb. 4: Messung der Reflektivität einer 35 nm dicken Kohlenstoffschicht bei 4° Einfallswinkel. Die Simulation wurde unter Verwendung der röntgenoptischen Daten nach Henke et al. berechnet. Die Messung wurde mit s-polarisierter Strahlung am Reflektometer/HASYLAB durchgeführt.

Für das Erreichen dieses Ergebnisses war es notwendig, den Beschichtungsprozess sowohl im Hinblick auf eine möglichst hohe Dichte als auch eine möglichst niedrige Kontamination der Schicht zu optimieren. Ein Vergleich mit Schichten anderer Hersteller zeigte bei den GKSS-Schichten die bislang besten Resultate. Erste Untersuchungen zur Belastbarkeit der Spiegel wurden ebenfalls durchgeführt. Nach den bisherigen Ergebnissen sind die GKSS-Spiegel von hervorragender Qualität und Stabilität für die Verwendung in der „seeding option“.

Dr. Michael Störmer  
GKSS

(Das GKSS-Forschungszentrum gehört zum Netzwerk für die Forschung an Materialien der Nanotechnologie, NanoMat.)

+++ Veranstaltungen +++ Veranstaltungen +++ Veranstaltungen +++ Veranstaltungen +++

9. – 11. Oktober, 2002  
Chemical Nanotechnology Talks  
Universität Mannheim,  
<http://www.dechema.de/veranstaltung/cnt-iii/englisch/index.htm>

10. – 13. Oktober, 2002  
10<sup>th</sup> Foresight Conference on Molecular Nanotechnology  
Hyatt Hotel, Bethesda, Maryland  
<http://www.foresight.org/conference>

11. – 12. Oktober, 2002  
2<sup>nd</sup> International Workshop on Electrodeposited Nano-structures (EDNANO-2-3)  
Budapest, Ungarn  
<http://www.szfk.hu/~bakonyi/ednano.html>

14. – 17. Oktober, 2002  
Nanotechnology Business Roadmap for Industry Meeting  
Chicago, Illinois  
<http://www.infocastinc.com/NanoRoadmap/nnrp.htm>

21. – 25. Oktober, 2002  
Materiaux 2002 Symposium on Nanostructured Powders and NanoMaterials: from Fundamental to Industrial Applications  
<http://www.materiaux2002.net>

27. – 30. Oktober, 2002  
Nanoparticles 2002 Conference  
Hotel Pennsylvania, New York City, New York  
<http://www.bccresearch.com/nano2002>

3. – 8. November, 2002  
Second Tropical Conference on Nanoscale Science and Engineering  
American Institute of Chemical Engineering (AIChE)  
Indianapolis, Indiana  
[http://engineering.purdue.edu/ChE/NanoChmE/NSE\\_Tropical\\_2002/Nanoscale2002.htm](http://engineering.purdue.edu/ChE/NanoChmE/NSE_Tropical_2002/Nanoscale2002.htm)

25. – 26. November, 2002  
NanoFair 2002  
Palais de Congrès, Straßbourg, France  
<http://www.nanofair.com>