

Materialwissenschaften

Ruhr-Universität Bochum

Nr. 3

Forschungsschwerpunkte und Informationen

SS 99

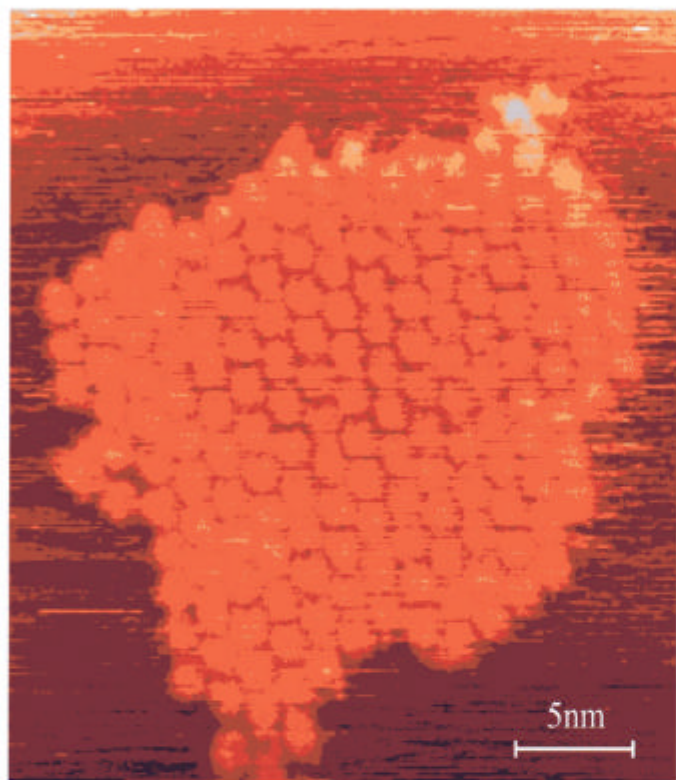


Bild 1: STM-Abbildung einer Insel bestehend aus einer Lage von modifizierten Hexaphenylbenzol-Molekülen auf einer Cu (111) - Oberfläche. Ein heller Punkt entspricht jeweils einem modifizierten HPB-Molekül. Die Höhe der Insel beträgt 0,21 nm.

Gunther Eggeler, Institut für Werkstoffe - Werkstoffwissenschaft

Intro

Dies ist bereits das dritte Mal, daß die Materialwissenschaftler der Ruhr-Universität Bochum (RUB) in einer kleinen Farbbroschüre in allgemeinverständlicher Form über ihre Forschungsthemen berichten. Materialwissenschaften sind als interdisziplinäre Forschungsrichtung in verschiedenen Fakultäten beheimatet. Dazu gehören die naturwissenschaftlichen Fakultäten für Physik, Chemie und Geowissenschaften sowie die ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und des Bauingenieurwesens. Entsprechend

vielfältig ist das Spektrum der Forschungsthemen, das an der RUB bearbeitet wird. Die gemeinsame Klammer ist dabei das Interesse an den Zusammenhängen zwischen Synthese bzw. Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. An der RUB wird eine breite Palette von Stoffen in verschiedenen Dimensionen und Formen untersucht. Die materialwissenschaftlichen Forschungsthemen reichen von ultradünnen Schichten mit besonderen physikalischen Eigenschaften, über nanostrukturierte Halbleitermaterialien bis hin zu Materialfragen der heterogenen

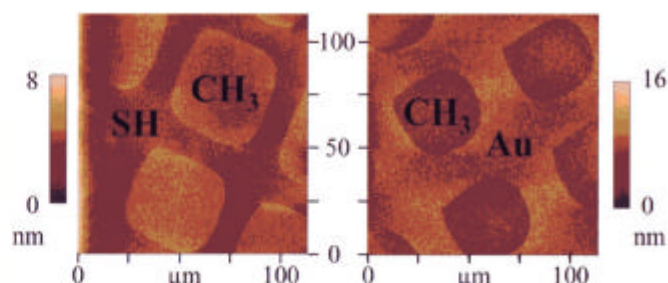


Bild 2: Die Methode der selektiven MOCVD ermöglicht auf durch μ -Contact-Printing strukturierten Oberflächen die Erzeugung von Goldstrukturen im Mikrometerbereich.

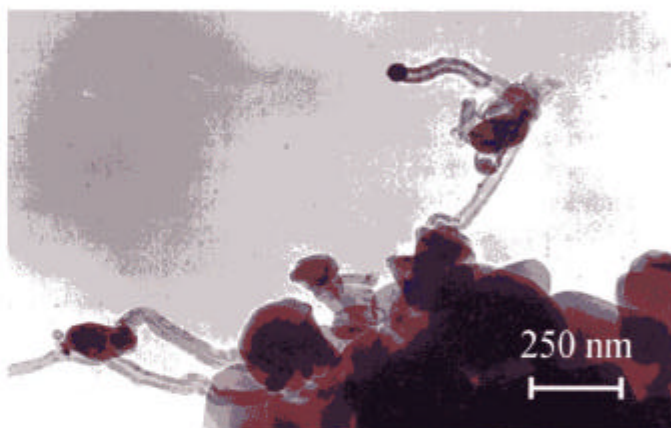


Bild 3: TEM-Aufnahme eines Kohlenstoff-Nanoröhrchens mit Nickelkristallit auf einem Ni/ α - Al_2O_3 -Katalysator.

Katalyse und mechanischen Eigenschaften moderner Ingenieurwerkstoffe. Chemische, physikalische, elektronische und mechanische Materialeigenschaften werden untersucht. Im Bochumer Umfeld beziehen die Materialwissenschaftler ihre Stärke aus ihrer Einbindung in ihre jeweiligen Fakultäten. Dabei sind sie gleichzeitig in einem übergreifenden Materialforum organisiert, das diese Broschüre herausgibt, das als Plattform für die Initiierung gemeinsamer Forschungsaktivitäten dient und in unregelmäßigen Abständen einen Materialwissenschaftlichen Tag organisiert. Dieser soll im Jahr 2000 wieder stattfinden und wir werden Sie rechtzeitig darüber informieren. Junge Materialwissenschaftler können nach der Zwischen-

prüfung in allen Fakultäten materialwissenschaftliche Vorlesungen hören. Auch diesen Lehrexport von Fakultät zu Fakultät hilft das Materialforum der RUB organisieren. So werden junge Materialwissenschaftler unterschiedlicher Couleur herangebildet, die bei einer festen Anbindung an eine klassische Ausbildungsrichtung (Physiker, Chemiker, Geowissenschaftler, Diplom-Ingenieur) bereits im Studium gelernt haben, materialwissenschaftliche Probleme interdisziplinär zu sehen. Mit dieser Broschüre wollen wir auf unser Materialforum an der RUB und auf die Aktivitäten der Bochumer Materialwissenschaftler in Forschung und Lehre aufmerksam machen. Viel Spass beim Lesen!

Herstellung und elektrische Eigenschaften von InAs-Quantenpunkten

In der Halbleitertechnologie geht der Trend zu immer kleineren Bauelementen, um die Integrationsdichten zu erhöhen. Allmählich stößt man jedoch mit den traditionellen Herstellungstechnologien an Grenzen. Um in das Gebiet der Nanoelektronik (Abmessungen der Halbleiterbauelemente kleiner ca. 100nm) vorzustoßen, muß über neue Konzepte nachgedacht werden. Zudem verläßt man das Gebiet der klassischen Elektronik und Quanteneffekte spielen eine immer größere Rolle. Quantenfilmstrukturen finden im High-Electron-Mobility-Transistor (HEMT) bereits eine wichtige Anwendung. Über den Quantendraht (die Elektronen können sich nur noch in eine Richtung frei bewegen) gelangt man schließlich zum Quantenpunkt (die Ladungsträger sind an einem Ort lokalisiert). Aufgrund der geringen Bauelementabmessungen wird hier das Schalten und Speichern einzelner Elektronen möglich. Neben den rein elektrischen Anwendungen als Einzelelektronentransistor, Speicher oder hochempfindliches Elektrometer, erhofft man sich auch in der Halbleiteroptik deutliche Fortschritte durch die besonderen Eigenschaften solcher 0-dimensionalen Systeme. So erwartet man zum Beispiel eine deutliche Erniedrigung der Schwellströme in einem Quantenpunktlaser und Leuchtdioden auf Si-Wirtsmaterial mit Quantenpunkten in der lichtemittierenden Zone sind denkbar. Auch vom Standpunkt der Grundlagenforschung sind diese 0-dimensionalen Systeme äußerst interessant. Man möchte zum Beispiel auf der Basis von Quantenpunktstrukturen Einzelelektronenpumpen realisieren und damit einen neuen Stromstandard definieren.

Ein wichtiges Werkzeug zur Herstellung von niederdimensionalen Systemen ist die Molekularstrahlepitaxanlage.

Hier können im Ultrahochvakuum unterschiedliche Materialien epitaktisch aufeinander abgeschieden und somit hochreine Schichtsysteme hergestellt werden. Folglich sind im Falle gitterangepasster Systeme zweidimensionale Quantenfilme relativ einfach herzustellen. Für die Realisierung von Quantendrähten und Quantenpunkten ist jedoch zusätzlich eine Einschränkung der Ladungsträgerbewegung auf wenige 10nm in lateraler Richtung (senkrecht zur Wachstumsrichtung) erforderlich. Eine Alternative zur aufwendigen lithographischen Herstellung von Quantenpunkten stellt das Wachstum im Stranski-Krastanov-Modus dar. Hierbei bilden sich zum Beispiel beim Abscheiden von InAs auf GaAs durch eine Gitterfehlpassung von 7% kleine InAs-Inseln mit einer lateralen Ausdehnung von ca. 30nm und einer Höhe von ca. 10nm. Die Dichte dieser Inseln wächst nahezu sprunghaft zwischen 1.5 und 1.8 Monolagen nomineller InAs-Schichtdicke von Null auf 10^{10} cm^{-2} an. Dabei sind Form und Ausdehnung der InAs-Cluster erstaunlich homogen. Zudem ist das Gitter der so entstandenen Inseln zwar verspannt aber absolut frei von Versetzungslinien. Somit besitzen die InAs-Inseln nach ihrem Überwachsen mit GaAs ausgezeichnete elektrische und optische Eigenschaften.

Für Transportuntersuchungen an einzelnen Quantenpunkten wurden die Inseln in den Kanalbereich einer HEMT-Struktur eingebaut. Aufgrund des speziellen Schichtaufbaus befinden sich hierbei die Elektronen nur in einem bestimmten Bereich - dem Kanal - der Schichtstruktur (2DEG). Anschließend wurde mit dem Rasterkraftmikroskop und nachfolgendem naßchemischen Ätzen ein 100nm breiter Kontaktbereich zwischen den linken und rechten Elektronenreservoirs definiert.

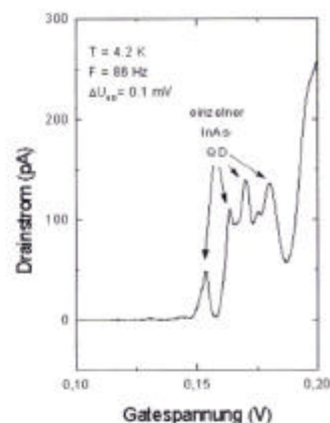
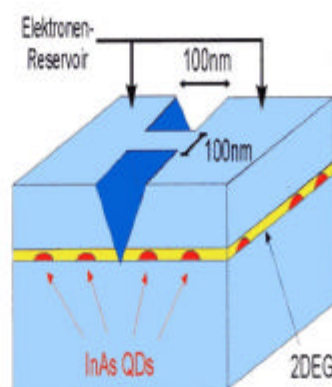


Bild 4: InAs-Quantenpunkte im Kanalbereich einer HEMT-Struktur (links). Das Kontaktgebiet zwischen den beiden Elektronenreservoirs wurde mit Hilfe des Rasterkraftmikroskops und anschließendem naßchemischen Ätzen definiert. Die Abbildung rechts zeigt die Transportcharakteristik von Elektronen durch eine einzelne InAs-Insel im Kontaktbereich.

Befindet sich eine InAs-Insel in diesem Kontaktbereich, so kann aufgrund der geringen Kontaktabmessungen ein Elektron vom linken Reservoir nur über die InAs-Inseln in das rechte Reservoir gelangen (Bild 4). Die scharfen Linien in der Transportkennlinie von Bild 4 spiegeln den sukzessiven Transport einzelner Elektronen durch ei-

nen einzelnen Quantenpunkt wider. Aufgrund der starken Lokalisierung der negativen Ladung im Quantenpunkt benötigt man eine immer höhere Spannung, um einen neuen Transportpfad durch den Quantenpunkt zu öffnen (Coulomb-Blockade), was in einer Stromspitze in der Transportkennlinie resultiert.

O. Hinrichsen, E. Löffler, W. Grünert, M. Muhler

Heterogen katalysierte Herstellung neuer Materialien

Der Begriff "Katalysator" ist vor allem durch die Einführung des Drei-Wege-Katalysators im Automobil in das öffentliche Bewußtsein gelangt. Tatsächlich enthalten heute mehr als 80 % aller industriellen chemischen Prozesse katalytische Verfahrensschritte. Die Wirkung von Katalysatoren besteht darin, daß chemischen Reaktionen energetisch günstigere Wege gebahnt werden, so daß diese schneller verlaufen – ohne jedoch den Katalysator zu verbrauchen. Bei vielen Reaktionen sind verschiedene Verläufe möglich, die zu unterschiedlichen Produkten führen. In diesem Fall führt erst der Einsatz des Katalysators zum gewünschten Produkt. Durch die Katalyse kann deshalb Energie und Rohstoff gespart werden und die Produktion von umweltbelastenden Abfallstoffen vermieden werden.

Bei einem heterogenen Katalysator handelt es sich um einen meist porösen Festkörper, der in Kontakt mit einem strömenden Gas- oder auch Flüssigkeitsgemisch gebracht wird. Die chemische Reaktion findet auf der Oberfläche des Festkörpers statt, auf der die Ausgangsstoffe durch Adsorption gebunden und aktiviert werden. Die adsorbierten Stoffe können so miteinander reagieren und durch Desorption in die Gasphase die Oberfläche verlassen. Hinzu kommen Transportschritte durch Diffusion, um aus dem strömenden Gas zum Festkörper und in dessen Poren hinein und wieder heraus zu gelangen. Am Lehrstuhl für Technische Chemie beschäftigen wir uns als Expertenteam mit der Aufklärung der Reaktionsschritte auf atomarem Niveau und deren Beeinflussung durch die Struk-

tur der Oberfläche, um durch das vertiefte Verständnis der Reaktion die Katalysatoren und deren Einsatz im Reaktor verbessern zu können. Dazu benutzen wir entweder die Reaktion selbst, d.h. wir führen kinetische Untersuchungen durch, um die Geschwindigkeiten der einzelnen Reaktionsschritte und deren Beeinflussung durch die Art des Katalysators zu bestimmen, oder wir setzen vor allem oberflächenempfindliche Spektroskopien ein, die entweder wie die Infrarot-Schwingungsspektroskopie bei atmosphärischem Druck oder wie die Photoelektronenspektroskopie im Ultrahochvakuum eingesetzt werden.

Die Herstellung von Solar-Silizium zählt zu den größten Projekten, die derzeit am Lehrstuhl für Technische Chemie bearbeitet werden. Bislang konnten die Solarzellenhersteller ihr Ausgangsmaterial von der Halbleiter-Elektronikindustrie beziehen. Bei einem weiteren Wachstum des Marktes ist jedoch eine Verknappung abzusehen, so daß neue und vor allem kostengünstigere Verfahren für die Reinigung des durch Reduktion von Quarzsand mit Kohlenstoff hergestellten metallurgischen Siliziums ($\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$) entwickelt werden müssen. Die hohe Reinheit ist für den Einsatz

in der Photovoltaik unerlässlich, erfordert jedoch die Umwandlung des festen Siliziums in leichtflüchtige Chlorsilane, die durch Destillation gereinigt und dann wieder zu Silizium zersetzt werden können. Der Abbau zu den Chlorsilanen erfolgt in einem Wirbelschichtreaktor, der in Bild 5 gezeigt wird. Dabei werden die Silizium-Körner von unten mit einem chlorwasserstoffhaltigen Gasgemisch angeströmt, das diese aufwirbelt und gut durchmischt. Auf der Oberfläche der Siliziumkörner findet die Reaktion des Siliziums mit adsorbiertem Chlorwasserstoff zu den Chlorsilan-Molekülen ($\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{HSiCl}_3 + \text{H}_2$) statt, die den Reaktor im Gasstrom oben verlassen. Unsere Aufgabe ist die Entwicklung eines Katalysators, der den Abbau des festen Siliziums beschleunigt. In Frage kommen zum Beispiel Übergangsmetallverbindungen, die die Chlorübertragung auf der Siliziumoberfläche erleichtern. Ähnlich wie bei Korrosionsphänomenen findet ein Lochfraßmechanismus statt, dessen Effizienz der Katalysator steuert. Wir sind zuversichtlich, daß wir in den nächsten Jahren die atomaren Vorgänge durch kinetische, spektroskopische und mikroskopische Untersuchungen aufklären können.

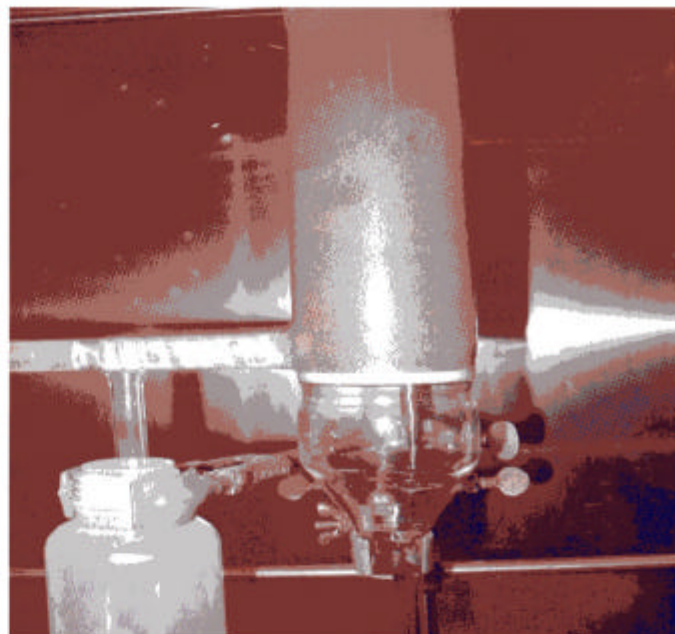


Bild 5: Abbau von Silizium zu Chlorsilan im Wirbelschichtreaktor.

Andreas Schreyer, Hartmut Zabel

Untersuchung magnetischer Strukturen dünner Schichten

Durch Abscheiden im Vakuum ist man in der Lage, einkristalline Metallschichten mit Schichtdicken von wenigen Atomlagen und atomar fast glatten Grenzflächen herzustellen. Diese Technik erlaubt die Erzeugung von geschichteten Strukturen aus magnetischen und nicht-magnetischen Materialien, bei denen neuartige Quanteneffekte auftreten. Diese Quanteneffekte können z.B. bei bestimmten Schichtdicken dazu führen, daß sich in einem Schichtstapel aus einem ferromagnetischen und einem nicht-

ferromagnetischen Metall die benachbarten ferromagnetischen Schichten antiparallel einstellen. Dieser Effekt kann mit einer drastischen Erhöhung des elektrischen Widerstandes verknüpft sein. Wenn durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes die antiparallele Stellung aufgebrochen wird, sinkt der Widerstand wiederum stark ab. Die Entdeckung dieses sogenannten Riesenmagnetowiderstandseffekts löste intensive anwendungsorientierte Forschungsaktivitäten aus, die auf die Nutzung zur Magnetfeldmessung ausgerich-

tet sind. Inzwischen sind bereits Festplatten mit entsprechenden Leseköpfen (IBM) und magnetische Positions- und Rotationsensoren (Siemens) am Markt eingeführt. Von der Entdeckung und Patentierung des Effektes (durch Prof. P. Grünberg, Forschungszentrum Jülich) bis zur Einführung des ersten marktreifen Produkts im Jahre 1997 sind in diesem Fall nur 9 Jahre vergangen.

Dieses Beispiel führt sowohl das Anwendungspotential dünner magnetischer Schichten, als auch die entscheidende Bedeutung der genauen Kenntnis der magnetischen Struktur solcher Materialien vor Augen. Am Lehrstuhl Experimentalphysik/Festkörperphysik der Ruhr-Universität Bochum werden systematisch verschiedenste magnetische Dünnschichtsysteme hergestellt und untersucht. Zur Analyse der magnetischen Struktur dieser Schichtsysteme wird neben einer besonders empfindlichen Magnetometriemethode (magnetooptischer Kerr-Effekt) die Neutronenstreuung eingesetzt. Neutronen sind wegen ihrer Wechselwirkung mit magnetischen Momenten eine besonders geeignete Sonde zur Aufklärung magnetischer Strukturen auf atomarer Ebene.

Die Methode wurde am Lehrstuhl in den letzten Jahren systematisch weiterentwickelt, um auch die neu aufkommenden

Fragen zur magnetischen Struktur dünner Schichten untersuchen zu können. In diesem Rahmen wurde an der europäischen Hochflußneutronenquelle, dem Institut Laue Langevin in Grenoble/Frankreich, das Neutronenreflektometer/Diffraktometer ADAM (Advanced Diffractometer for the Analysis of Materials) gebaut. ADAM gehört zu den weltbesten Instrumenten seiner Kategorie hinsichtlich Neutronenfluß und Auflösung. Durch Nutzung polarisierter Neutronen sowie durch Polarisationsanalyse der gestreuten Neutronen können magnetische Strukturinformationen gewonnen werden, die anderweitig nicht erhältlich sind. In Bild 6 ist das Instrument schematisch dargestellt.

Durch Einsatz bei kleinen Streuwinkeln können Strukturen auf Längenskalen von einigen nm analysiert werden, während das Instrument bei großen Streuwinkeln auf atomare Abstände empfindlich ist. Durch Kombination dieser Fähigkeiten kann so z.B. in Stapelstrukturen aus Fe- und Cr-Schichten einerseits die relative Orientierung benachbarter ferromagnetischer Fe-Lagen von je einigen nm Dicke untersucht werden. Andererseits ist die magnetische Struktur der antiferromagnetischen Cr-Zwischenlagen auf Längenskalen von wenigen zehntel nm zugänglich. Ein ty-

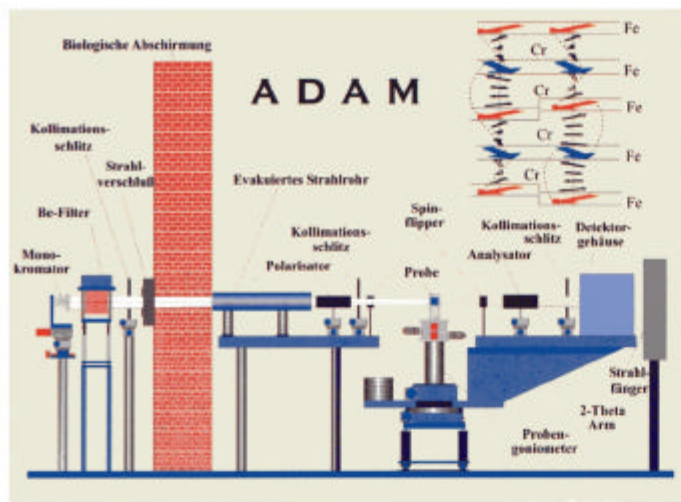


Bild 6: Schematische Darstellung des Neutronenreflektometers/Diffraktometers ADAM am Institut Laue Langevin, Grenoble.

phisches Ergebnis einer solchen Untersuchung ist in Bild 6 rechts oben schematisch wiedergegeben. Eine komplizierte spiralförmige Cr-Struktur induziert eine 90°-Orientierung benachbarter Fe-Lagen. Derartige Untersuchungen haben grundlegende Fragestellungen am Schichtsystem Fe/Cr/Fe aufgeklärt, an dem der oben erwähnte Riesenmagnetowiderstandseffekt ursprünglich entdeckt worden war. Eine sich neuerdings abzeichnende Anwendung magnetischer

Schichten ergibt sich aus ihrer Beeinflussbarkeit durch Aufnahme von Wasserstoff. So kann die magnetische Kopplung, die die Antiparallelstellung der ferromagnetischen Lagen induziert, abgeschaltet werden oder bestimmte Metalle können von spiegelnd auf durchlässig geschaltet werden. Auch in diesem Bereich liefert die Neutronenstreuung wegen des großen Streuquerschnitts von Wasserstoff wichtige Beiträge zum Verständnis derartiger Materialien.

Hermann Gies, Bernd Marler

Vom Katzenstreu zum Mikrolaser: Zeolithe in moderner Anwendung

Unter Zeolithmaterialien (Zeolith, griechisch: siedender Stein) faßt man eine enorme Vielfalt von natürlichen und synthetischen Stoffen zusammen. Alle Zeolithe haben eine kristalline Struktur aus einem stabilen porösen (Silikat- oder Phosphat-) Gerüst, das Hohlräume von molekularer Größe aufweist. Diese Hohlräume können leer oder von organischen Molekülen, Wasser und Kationen (z.B. Na⁺) besetzt sein. Bild 7 zeigt die Struktur eines der vielen Zeolithtypen mit einem Gerüst, das zur Übersichtlichkeit als Skelettmodell gezeichnet ist. Verschiedene Ionen und Moleküle finden im Porenraum Platz oder werden aufgrund ihrer Größe abgewiesen. Zeolithe werden auf vielfältige Weise in Industrie

und Haushalt eingesetzt: Zur Wasserenthärtung nutzt man die Ionenaustauschfähigkeit, und geeignete Zeolithe finden sich deshalb in jedem modernen Vollwaschmittel, um die Calcium- und Magnesiumionen (Wasserhärte) gegen Natriumionen auszutauschen. Zeolithe sind außerdem gute Adsorbentien, die Wasser oder Schadstoffe aufnehmen und dauerhaft binden können (z.B. als Katzenstreu). Die Molekularsieb-Funktion ergibt sich durch die genau festgelegte Porengröße. Aus kompliziert zusammengesetzten Stoffgemischen können durch die Wahl geeigneter Zeolithmaterialien z.B. geradkettige Paraffinmoleküle, die für die Herstellung von Reinigungsmitteln und

Kosmetika benötigt werden, von "dickeren" Molekülen abgetrennt werden. Der bei weitem wichtigste Nutzen der Zeolithe ist der als saure formselektive Katalysatoren. Das Zeolithmaterial gibt die Form der Poren vor, in denen die Reaktionen ablaufen. In Kombination mit der chemischen Zusammensetzung des Gerüsts werden so nur ganz bestimmte Reaktionen zugelassen und dadurch reine Produkte erhalten (z.B. Cracken von Schweröl zur Benzinherstellung). Die grundsätzliche Möglichkeit, Zeolithmaterialien mit sehr variabler Zusammensetzung und mit unterschiedlichsten Kristallstrukturen herzustellen, sollte es theoretisch erlauben, Zeolithe für verschiedenste Anforderungen gezielt am Reißbrett zu konstruieren. Dieses Ziel ist ein besonderes Forschungsinteresse

zunehmendem Maße computer-gestützte Modellrechnungen zur Wirkungsweise der Schablonenmoleküle eine wichtige Rolle, um Rezepte zum gezielten "Zeolithdesign" zu finden. Zeolithgerüste bilden in vielen Fällen ideale "Behälter", um empfindliche Moleküle (z. B. Farbpigmente) vor aggressiver Atmosphäre zu schützen oder auch Moleküle mit bestimmten optischen oder elektronischen Eigenschaften aufzunehmen. Zukünftige Anwendungen zielen darauf hin, Effekte wie "second harmonic generation" auszunutzen, d.h. mittels Frequenzverdopplung aus eingestrahltm langwelligem Licht, kurzwelliges Licht zu erzeugen. Lumineszierende Moleküle, die bestimmte Plätze im Zeolithgerüst einnehmen, sind als Mikrolaser für neuartige technische Anwendungen denkbar.

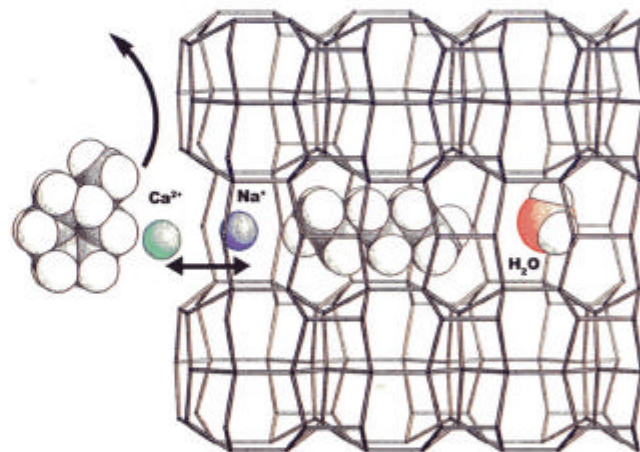


Bild 7: Die Käfigstruktur eines Zeoliths (Skelettmodell) bietet bestimmten Atomen und Molekülen Platz - anderen dagegen nicht.

unserer Arbeitsgruppe Kristallographie am Institut für Mineralogie der geowissenschaftlichen Fakultät. Mit Hilfe sogenannter Schablonenmoleküle, die während der Zeolithsynthese als Platzhalter in die Kristallstruktur eingebaut werden, wird der Porenraum der Zeolithe gestaltet. Durch die geschickte Auswahl der Schablonen und die genau festgelegte Syntheseführung sind so neue Zeolithmaterialien zugänglich, deren Porenraum für bestimmte chemische Reaktionen maßgeschneidert ist. Neben der Ableitung von allgemeinen kristallchemischen Gesetzmäßigkeiten und der Analyse natürlicher Zeolithbildungsprozesse spielen in

Impressum

Herausgeber:
Koordinationsausschuß der RUB-Materialwissenschaften
Redaktion und Gestaltung:
Dr. A. Birkner, Dr. M. Kolbe, Ruhr-Universität Bochum, Physikalische Chemie I, D-44780 Bochum
Tel. (0234) 700-5529, -4221
Autoren:
Dipl.-Ing. C. Bock
Prof. Dr. G. Eggeler
Prof. Dr. H. Gies
Prof. Dr. W. Grünert
Dr. O. Hinrichsen
Prof. Dr. U. Kunze
Dr. E. Löffler
Dr. B. Marler
Prof. Dr. M. Muhler
Dr. K. Schmidt
Dr. A. Schreyer
Dipl.-Phys. M. Versen
Prof. Dr. H. Zabel
Druck:
Gebrüder Hoose GmbH, Bochum