

Funktionale dünne Schichten und Physik mit Synchrotronstrahlung

Können kleinste Magnete zum Transport von Partikeln oder sogar zum Aufbau dreidimensionaler molekularer Strukturen benutzt werden?

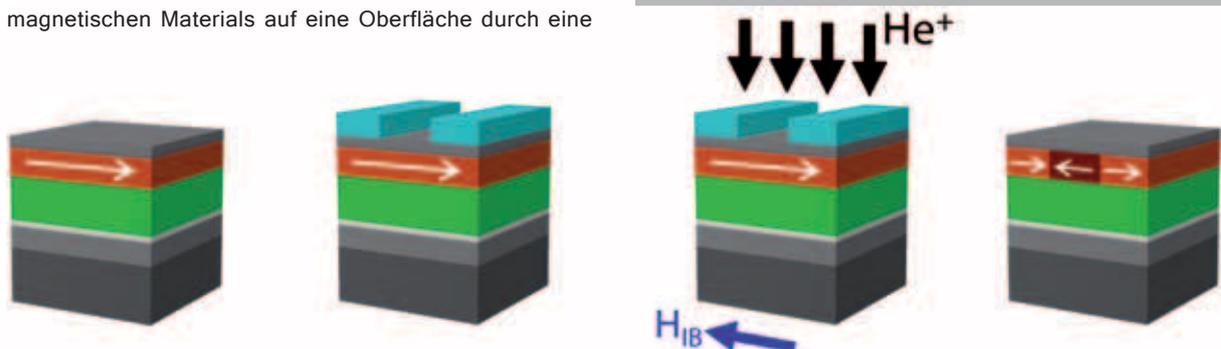
Prof. Dr. Arno Ehresmann startete im April 2005 seine Tätigkeit als Arbeitsgruppenleiter in Kassel. Zuvor hatte er schon einen größeren Forschungsbogen geschlagen, der ihn von Atomen, in denen er die komplizierten Wechselwirkungen vieler Elektronen untereinander studierte, über Untersuchungen von Photodissoziationsprozessen in Molekülen unserer Erdatmosphäre zu magnetischen und nichtmagnetischen Dünnschichtsystemen führte. Alle drei Interessen verfolgte er in Kassel weiter und er wurde wegen der vielen möglichen Anknüpfungspunkte schon 2005 assoziiertes Mitglied im CINSaT. Seit dieser Zeit hängt der wesentliche Schwerpunkt seiner Arbeiten mit Fragestellungen zusammen, welche die Erzeugung und nachträgliche Modifizierung magnetischer und nichtmagnetischer Dünnschichtsysteme beinhalten. Hierbei stehen sowohl grundlegende Fragestellungen als auch mögliche Anwendungen im Fokus der Arbeiten.

Design magnetischer Feldlandschaften

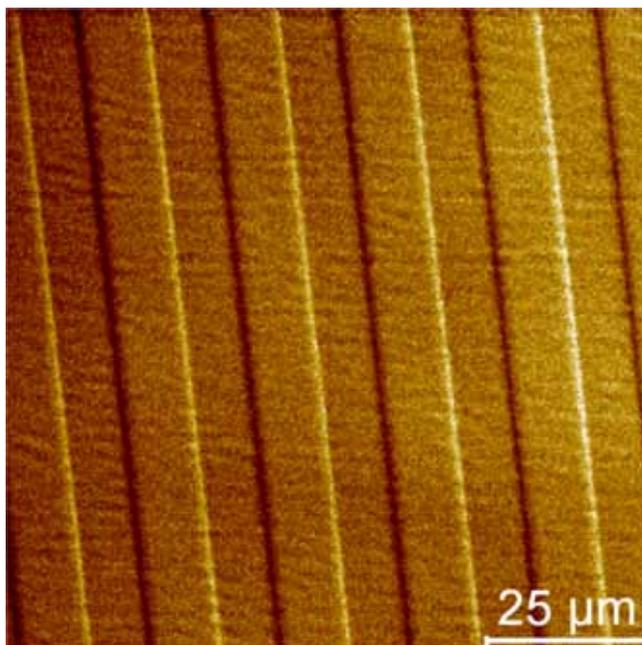
Gibt es eine Möglichkeit kleinste Magnete zu erzeugen und diese für die aktive Manipulation von Mikro- und Nanoobjekten zu benutzen? Mit dem ersten Teil dieser Frage beschäftigt sich Ehresmann seit er nach Kassel gekommen ist. Üblicherweise werden solche kleinen Magnete durch Abscheiden magnetischen Materials auf eine Oberfläche durch eine

Schattenmaske erzeugt. Dabei entstehen beispielsweise quader- oder ellipsenförmige Mikromagnete, die quasi auf der Oberfläche liegen und sich von ihr topographisch abheben. Diese Mikromagnete besitzen wie ihre großen makroskopischen Brüder einen Nord- und einen Südpol und erzeugen dadurch die gewünschten Felder. Die Oberfläche wird durch diese Magnete allerdings topographisch strukturiert, mit vielen Ecken und Kanten. Für den angestrebten Transport von Nanoobjekten hat dies Nachteile, da diese gerne an den Ecken und Kanten hängen bleiben. Ehresmann hat demgegenüber eine alternative Methode zur Erzeugung von kleinsten Magneten entwickelt, die sich deutlich davon unterscheidet. Er verändert dabei durch Heliumionen, die durch eine zuvor hergestellte Lochmaske treten, die magnetischen Eigenschaften von ebenen Schichtsystemen auf bestimmten Flächen. Die magnetischen Eigenschaften auf den abgeschatteten Flächen der Schichten bleiben erhalten. Dadurch können

Modifikation eines austauschvershobenen Dünnschichtsystems durch Helium-Ionenbeschuss:
Auf das mittels Sputterdeposition hergestellte Schichtsystem wird eine Lackmaske aufgebracht. Die Helium-Ionen treten unter Hochvakuumbedingungen an den unbelackten Stellen in das Schichtsystem ein und modifizieren die mit Pfeilen dargestellten, magnetischen Eigenschaften der Probe (von links nach rechts).



Magnetkraftmikroskopisches Bild eines mit Helium-Ionenbeschuss modifizierten Dünnschichtsystems. In zwei benachbarten Streifen sind die magnetischen Momente antiparallel ausgerichtet, so dass Domänenwände mit starken magnetischen Streufeldern (schwarze und weiße Linien) entstehen.



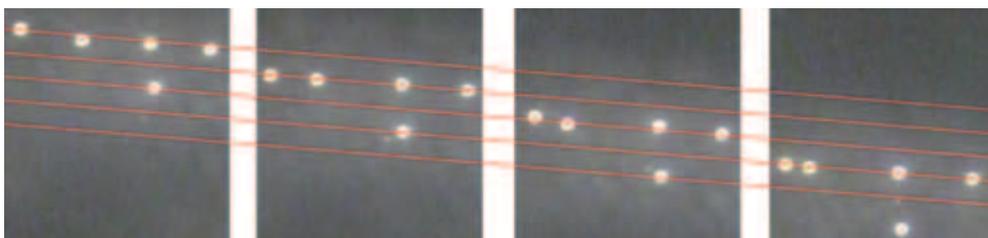
künstliche magnetische Domänen mit definierter Form erzeugt werden. Durch diese Prozedur treten sehr starke magnetische Streufelder an den Grenzlinien zwischen bestrahlten und unbestrahlten Bereichen aus. Da die Schattenmasken beliebig geformt werden können, können diese Grenzlinien fast beliebig gesetzt werden. Auch die austretenden Felder können nach Stärke und Richtung in weiten Bereichen variiert werden. Es entsteht eine komplexe magnetische Feldlandschaft nach Design. Durch Anlegen eines äußeren Feldes kann diese Feldlandschaft zusätzlich dynamisch gesteuert werden. Damit können in der Ausdehnung winzige aber in der Stärke sehr große magnetische Felder an- und abgeschaltet werden, um beispielsweise einen magnetischen Barcode zu realisieren oder magnetische Partikel oder Moleküle zu fangen oder Partikel oder Flüssigkeiten zu transportieren. Das Anwendungspotenzial dieser Technik erscheint riesig, gleichzeitig sind noch lange nicht alle Grundlagen verstanden.

Partikel und Moleküle gefangen in miniaturisierten magnetischen Feldern

Die magnetischen Feldlandschaften können beispielsweise als Fallen für magnetische Partikel benutzt werden. Streut man einfach Partikel in Flüssigkeit über die vorbereiteten Oberflächen, werden diese durch die Streufelder eingefangen und ordnen sich z.B. in Linien, Kreisen, Quadraten oder anderen Mustern an, die zuvor festgelegt worden sind. Dies sieht nicht nur hübsch aus, sondern soll in aktuellen Arbeiten für optische Bauelemente genutzt werden,

in so genannten Oberflächenplasmonsensoren. Hier könnte die Empfindlichkeit von derzeitigen Standard-Biosensoren deutlich gesteigert werden. Zu diesem Thema wird mit den Fachgebieten von Bernd Witzigmann aus der Elektrotechnik und Friedrich Herberg aus der Biologie kooperiert. In Arbeiten, die zusammen mit der Arbeitsgruppe von Ulrich Siemeling durchgeführt werden, wird untersucht, ob sich die Anlagerung von Molekülen an Oberflächen gezielt durch solche magnetischen Feldlandschaften beeinflussen lässt. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass dem so ist. Damit konnte eine bisher wenig beachtete Steuerungsmöglichkeit für Selbstassemblierungsprozesse nachgewiesen werden, die sich das Verhalten von Molekülen in Magnetfeldern zu nutze macht. In Zukunft soll geprüft werden, ob molekulare Schalter gebaut werden können, die über das An- und Abschalten von Magnetfeldern gesteuert werden können. Auch Fallen, in denen einzelne Moleküle gefangen werden können, erscheinen mit dieser Technik möglich. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Oliver Schmidt in Dresden wird darüber

Schrittweise Bewegung von magnetischen Partikeln auf einer mit Helium-Ionenbeschuss modifizierten Streifenstrukturprobe. Die Zeit zwischen der Aufnahme der Bilder beträgt jeweils 250 ms.



hinaus untersucht, ob selbstangetriebene Nanomotoren auf von Ehresmann erzeugten Magnetautobahnen entlang fahren können, ein Projekt das sich nach Science Fiction anhört, aber realisierbar erscheint. Zwei weitere Projekte, die in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Josef Salbeck entstehen befassen sich mit der Steuerung der Runzelbildung in viskosen organischen Schichten sowie über die Wechselwirkung zwischen Magnetismus, Optik und Ladungstransport in Transistoren mit organischen Materialien.

Gezielte Steuerung magnetischer Partikel über wandernde Felder

Kürzlich entdeckte die Gruppe von Ehresmann, dass die Oberflächenbereiche, aus denen die Streufelder hervortreten, gezielt durch ein von außen angelegtes Magnetfeld verschoben werden können. Damit ergibt sich eine Möglichkeit nicht nur magnetische Partikel durch statische Feldlandschaften anzuordnen, sondern sie auch gezielt über die Oberfläche zu verschieben. Viele spannende Fragestellungen ergeben sich dabei: Beispielsweise ist zur Zeit noch völlig unklar, ob die Partikel über die Oberfläche rutschen oder rollen und welche Rolle die diversen an die Partikel angreifenden Kräfte spielen. Unabhängig von solchen grundlegenden Fragestellungen kann eine solche Methode des magnetischen Partikeltransports zum Mischen geringster Flüssigkeitsmengen verwendet werden, wie die Gruppe von Ehresmann kürzlich ebenfalls nachgewiesen hat. Weitere Anwendungsmöglichkeiten bestehen wiederum in der Biosensorik und bei magnetophoretischen Anwendungen, in denen z.B. magnetische Partikel nach ihren Eigenschaften wie Größe oder Gewicht sortiert werden können. Auch unmagnetische Partikel können transportiert werden, wenn anstatt magnetischer Partikel in unmagnetischer Flüssigkeit unmagnetische Partikel in magnetischer Flüssigkeit verwendet werden. Dies sind sogenannte Ferrofluide, mit deren Hilfe und der von Ehresmann entwickelten Unterlage unmagnetische Partikel transportiert werden können.

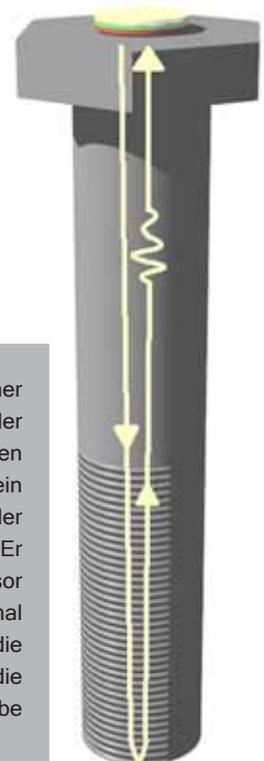
Schrauben geben eigenes Anzugsmoment an

In einer weiteren Anwendung dünner Schichten entwickelt Ehresmann in direkter Zusammenarbeit

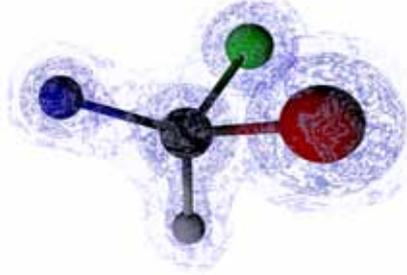
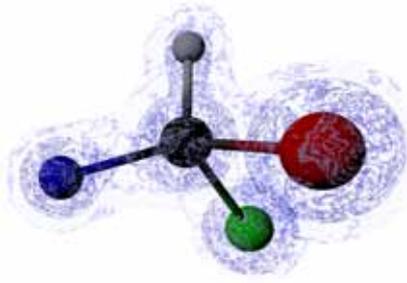
mit der Intellifast GmbH, Speyer, Schrauben, die an ihrem Kopf mit einem Schichtsystem bedampft werden, das eine Piezoschicht enthält. Dieses Schichtsystem wird durch ein von außen angelegtes starkes elektrisches Wechselfeld dazu veranlasst, sich rhythmisch auszudehnen und zusammenzuziehen. Dadurch wird ein Ultraschallpuls durch die Schraube geschickt, dessen Laufzeit gemessen wird. Die Geschwindigkeit dieses Pulses hängt mit dem Anzugsmoment der Schrauben zusammen, wenn sie eingeschraubt sind und ermöglicht so eine direkte Messung dieser Größe bei eingedrehten Schrauben. Diese Technik findet insbesondere bei Flugzeugen und Flugzeugmotoren ihre Anwendung, so dass während der regelmäßigen Wartungen immer überprüft werden kann, ob die Schrauben noch sitzen. Ein weiterer Vorteil dieser Technik besteht darin, dass die Form des Ultraschallpulses ebenfalls darüber Auskunft gibt, ob sich in der Schraube im Laufe der Zeit Mikrorisse gebildet haben, was eine wichtige Information in Hochsicherheitsanwendungen bedeutet.

Händigkeit von Molekülen untersucht mit Synchrotronstrahlung

In einem weiteren Forschungsfeld untersucht Ehresmann zusammen mit 9 weiteren Kollegen, wie sich Elektronen in einem chiralen Molekül bewegen. Moleküle entgegengesetzter Chiralität (Händigkeit) lassen sich trotz gleicher Bestandteile nicht mit ihrem Spiegelbild durch Rotation zur Deckung



Durch das Anlegen einer Spannung am Kopf der Schraube befindlichen Dünnschichtsensor wird ein Ultraschallpuls erzeugt, der durch die Schraube wandert. Er wird reflektiert und am Sensor wieder in ein Spannungssignal umgewandelt. Durch die Laufzeit des Pulses kann die Vorspannkraft der Schraube bestimmt werden.



Die Anregung von chiralen (händigen) Molekülen mit Hilfe von rechts- oder links zirkular polarisiertem Licht hat unterschiedliche Ergebnisse für die beiden Enantiomere des Moleküls. Die Effekte und die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten bei der Anregung, dem folgenden aussenden eines Photoelektrons und von Fluoreszenz oder bei der Spaltung derartiger Moleküle sollen im Rahmen des ELCH-Projektes auf atomarem Maßstab untersucht werden.

bringen, genauso wenig wie linke und rechte Hand. Sie wechselwirken auf Grund der unterschiedlichen Anordnung ihrer Bestandteile verschieden mit ihrer Umgebung. In der (Bio)Chemie ist die Chiralität eines Moleküls entscheidend für seine chemischen und physiologischen Reaktionen, da alle wesentlichen Bausteine des Lebens, wie z.B. DNS-Moleküle, eine ganz bestimmte Chiralität besitzen. Daher hängt auch die Wirksamkeit von Medikamenten von der Händigkeit der Wirkstoffmoleküle ab, oder Moleküle entgegengesetzter Chiralität (Enantiomere) rufen verschiedene physiologische Reaktionen hervor (z.B. riecht (S)-(+)-Carvon nach Kümmel und (R)-(-)-Carvon nach Pfefferminz). Enantiomereine Stoffe besitzen deshalb ebenso wie enantiomerelektive Nachweis- und Trennmethode große Bedeutung in der pharmazeutischen Industrie. Während im klassischen Strukturmodell der Chemie Chiralität mit einer chiralen Anordnung der Atomkerne erklärt wird, sind atomare und molekulare Eigenschaften (z.B. das Reaktionsverhalten oder Prozesse nach Teilchenstrahl- oder elektromagnetischer Anregung) durch die Dynamik des Elektronensystems bestimmt. Dieser Aspekt konnte bisher für chirale Systeme kaum untersucht werden,

da die dazu erforderlichen aufwändigen experimentellen Techniken und theoretischen Methoden erst in den letzten Jahren entwickelt wurden. Ehresmann koordiniert nun eine Gruppe von Forschern, die diesem Phänomen auf den Grund gehen wollen. Aufgrund der komplementären Expertisen der experimentell arbeitenden Verbundpartner können erstmals fast alle in der Natur verfügbaren chiralen Sonden (zirkular polarisierte oder polarisationsgeformte Laserfelder, spinpolarisierte Elektronen und einzelne hochenergetische zirkular polarisierte Photonen (Synchrotronstrahlung))

genutzt werden, um im Vergleich mit theoretisch und numerisch anspruchsvollen Modellen der theoretisch orientierten Partner grundlegende Fragestellungen zur Chiralität in der Elektronendynamik zu beantworten. Die entsprechenden Phänomene sollen zunächst an grundlegenden und theoretisch beschreibbaren Molekülen durchgeführt werden, um sie dann im Anschluss für größere chirale Nanosysteme anwenden zu können.

Leuchtende Käfigmoleküle

Diamantoide sind käfigförmige Kohlenstoffmoleküle, in denen andere Moleküle gefangen werden können. Dies geschieht meist über chemische Reaktionen, an deren Ende oft nicht völlig klar ist welche und wie viele Produkte entstanden sind. Daher werden Diamantoide von Ehresmann zusammen mit der Gruppe von Thomas Möller (TU Berlin) nach Anregung mit Synchrotronstrahlung untersucht, um herauszufinden ob man auf Grund ihrer Lichtemission Aufschlüsse über ihre Struktur und ggf. auf eingeschlossene Moleküle oder Atome gewinnen kann. Diese Experimente wie auch die vorstehenden über Chiralität werden an den Synchrotronstrahlungsquellen BESSYII in Berlin und PETRAIII in Hamburg durchgeführt.

Prof. Dr. Arno Ehresmann

Prof. Dr. Arno Ehresmann studierte an der Universität Kaiserslautern (jetzt: TU Kaiserslautern) Experimentalphysik und promovierte 1994 über Elektronenkorrelationen in Atomen. Es folgte ein Forschungsaufenthalt am Tokyo Institute of Technology, Japan, bis 1996. Nach einer Anstellung als Entwicklungsleiter Systemtechnik und Projektmanager bei der Deutschen Babcock Turbo-Lufttechnik GmbH bis 1998 kehrte er 1999 wieder an die Universität Kaiserslautern zurück und habilitierte dort 2002 über das Photodissoziationsverhalten kleiner Moleküle. Seit 2005 leitet er das Fachgebiet „Funktionale dünne Schichten und Physik mit Synchrotronstrahlung“ am Institut für Physik der Universität Kassel. Er ist seit 2010 Sprecher des CINSaT. Aktuelle Forschungsinteressen sind magnetische Dünnschichtsysteme und deren Anwendungen in der Sensorik, speziell in der Biosensorik, das Design magnetischer Streufeldlandschaften durch Design magnetischer Domänen, der Transport von Mikro- und Nanopartikeln, die Untersuchung chiraler Moleküle, sowie quantenmechanische Interferenzprozesse.

