

Seit jeher ist ein zentrales Bestreben der Naturwissenschaften die Aufklärung kleinster Strukturen. So besitzen wir heute eine solide Kenntnis etwa von der komplexen biologischen Beschaffenheit einer Zelle, vom detaillierten Aufbau riesiger Moleküle oder von der hochsymmetrischen atomaren Anordnung in kristallinen Festkörpern. Selbst die innere Struktur der Atome ist weitestgehend aufgeklärt. Seit einigen Jahren zeichnet sich jedoch eine völlig neue Dimension des naturwissenschaftlichen Interesses an ultrakleinen Strukturen ab. Mit der Entdeckung von direkten Zugriffsmöglichkeiten auf die einzelnen Bausteine unbelebter und belebter Materie sowie mit dem damit zunehmenden Verständnis für die Selbstorganisation dieser Bausteine hat weltweit eine "industrielle Eroberung" nanoskaliger Dimensionen eingesetzt. Das schon jetzt erreichte Innovationstempo der Nanotechnologie führt dazu, dass einerseits noch wesentliche naturwissenschaftliche Grundlagen vieler Phänomene auf der Nanometerskala erforscht werden müssen, während schon erste nanotechnologische Produktgruppen die Weltmärkte betreten und die Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts angesehen wird. Es ist evident, dass innerhalb der Nanostrukturforschung und innerhalb der Nanotechnologie die Vermessung und Analyse nanoskaliger Objekte eine herausragende Stellung einnimmt. Daher ist es notwendig, anhand der heute absehbaren Bedürfnisse der Nanostrukturforschung und der Nanotechnologie die ausgeprägt interdisziplinären Forschungsziele im Bereich der Nanoanalytik für die nächsten Jahre möglichst klar zu definieren.

## Vermessung und Analyse von Nanostrukturen - Eine der großen interdisziplinären Herausforderungen für die kommenden Jahre

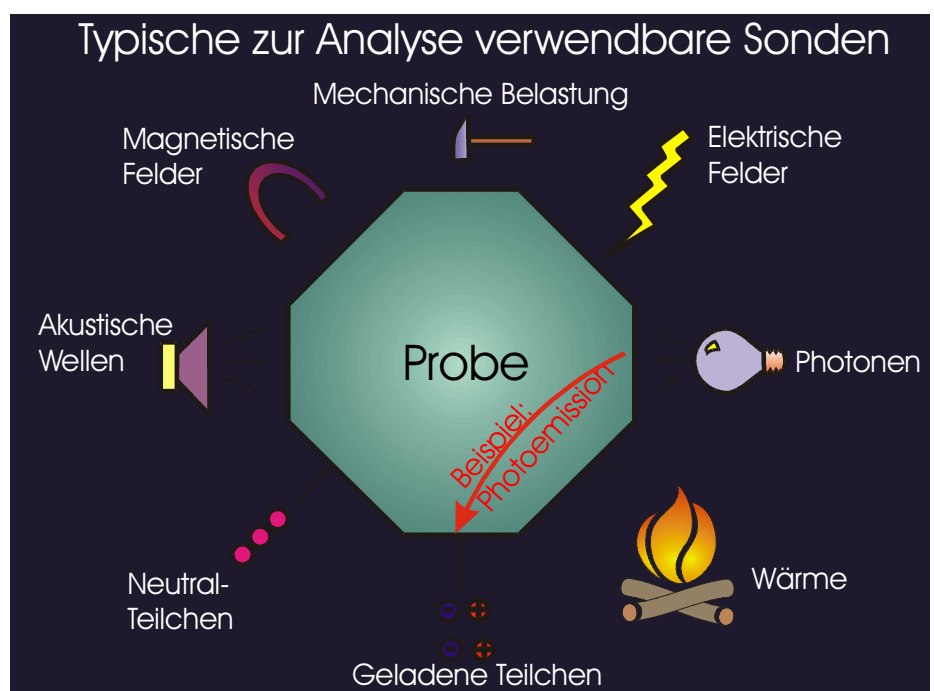
Die Vermessung einer Detailstruktur oder eines kompletten Objektes besteht darin, die Geometrie im Idealfall in drei räumlichen Dimensionen mit hinreichender Präzision quantitativ zu erfassen. Gegenstand einer analytischen Charakterisierung ist zudem die Erfassung bestimmter funktionaler Eigenschaften der Struktur oder des Objektes, wie beispielsweise der chemischen Zusammensetzung, des elektronischen Transportverhaltens, der mechanischen Härte oder etwa des optischen Verhaltens.

Um geometrische oder funktionale Eigenschaften zu erfassen, muss die zu untersuchende Struktur mit einer geeigneten Sonde

analysiert werden. Wie in Abb. 1 dargestellt, besteht der Charakterisierungsvorgang darin, dass die Probe aufgrund geeigneter durch die Sonde hervorgerufener Stimuli in Form bestimmter physikalischer Informationen reagiert und mittels eines geeigneten Detektors die physikalische Reaktion der Probe

sondiert wird. In einem konventionellen Lichtmikroskop besteht der Probenstimulus im einfallenden sichtbaren Licht, welches in bestimmter Weise von der Probe reflektiert oder durch sie transmittiert wird. Die Reaktion der Probe auf diese Stimulans wird dann in Form einer Intensitätsverteilung mit dem

**Abb. 1:** Die Analyse funktionaler Eigenschaften einer Probe erfolgt über geeignete physikalische Stimuli, welche dann eine „Antwortfunktion“ der Probe hervorrufen, die mittels eines geeigneten Detektors registriert wird. Sowohl die Stimuli wie auch die detektierten Antwortsignale können in geladenen oder ungeladenen Teilchen, in Feldern oder Wellen bestehen. Hieraus resultieren zahlreiche Kombinationen zwischen Stimulus und Antwortfunktion. So erfolgt beispielsweise die Anregung der Probe im Fall der Photoemission über Photonen, d. h. elektromagnetische Wellen variabler Energie, die dann zur Emission von Elektronen aus dem oberflächennahen Bereich der Probe Anlaß geben.



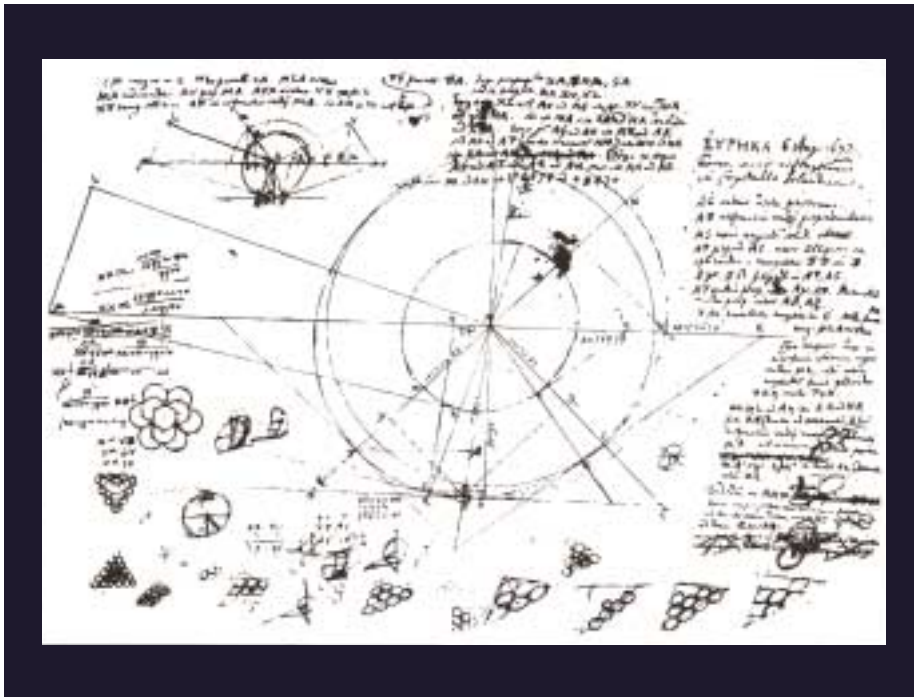


Abb. 2: Originalaufzeichnungen von Christiaan Huygens aus dem Jahre 1677 zur Deutung der Doppelbrechung im Kalkspat<sup>1)</sup>.

Auge oder einer Kamera detektiert. In diesem Fall besteht also sowohl die Sonde als auch das von der Probe als Reaktion auf die Sonde ausgesandte Signal in elektromagnetischen Wellen oder Photonen. Die optische Sonde ermöglicht es, Informationen über die geometrischen Dimensionen eines hinreichend großen Objektes zu erhalten und gestattet darüber hinaus die Erfassung weiterer funktionaler Eigenschaften, wie etwa der Farbe des Objektes oder der Fähigkeit zur Fluoreszenz.

Abbildung 1 verdeutlicht, dass wir heute über mannigfaltige apparative Möglichkeiten zur Analyse verfügen, wobei die physikalischen Stimuli wie auch Antwortsignale der zu analysierenden Struktur geladene oder ungeladene Teilchen, Felder oder Wellen sein können. Die resultierenden Kombinationsmöglichkeiten zwischen Stimulus und physikalischer Antwort der Probe ermöglichen dann die Erfassung unterschiedlichster funktionaler Eigenschaften der Probe. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Stimulanz der Probe durch eine Sonde grundsätzlich bedeutet, dass a priori die Probeneigenschaften durch die Anwesenheit der Sonde beeinflusst werden, da sich ja Sonde und Probe in einer physikalischen Wechselwirkung befinden. Diese Wechselwirkung kann im Extremfall sogar destruktiv sein, wie es der Fall wäre, wenn beispielsweise ein biologisches Objekt nicht mit den niederenergetischen Photonen des sichtbaren Lichtes, sondern mit den hochenergetischen harter Röntgenstrahlung analysiert wird.

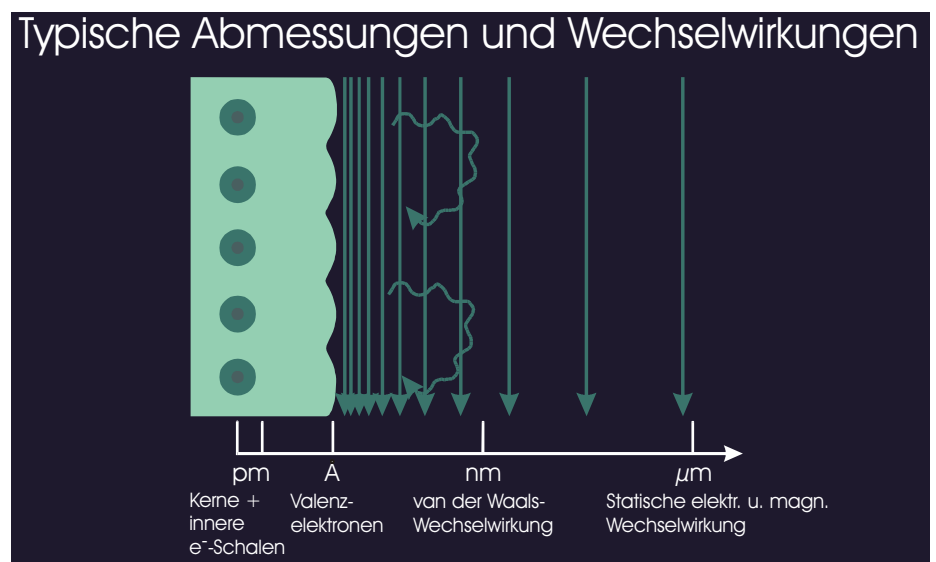
Neben der Wahl einer geeigneten Sonden-Detektor-Kombination ist von grundsätzlicher

Bedeutung gerade für die Untersuchung von Detailstrukturen oder kleiner individueller Objekte, dass Informationen global oder lokal gewonnen werden können. Global bedeutet dabei, dass der geometrische Bereich, aus dem Informationen gewonnen werden, sehr viel größer ist als die strukturelle Dimension, über die man Informationen erhalten möchte. Lokal bedeutet demgegenüber, dass die Ana-

lyse eine räumliche Auflösung liefert, die mindestens hoch genug ist, um die individuelle, zu analysierende Struktur aufzulösen. Dabei ist bemerkenswert, dass nicht nur geometrisch hochauflösende mikroskopische Verfahren Informationen über ultra-kleine Strukturen liefern. Als Beispiel hierfür möge wiederum die Analyse von Objekten mit sichtbarem Licht dienen.

Aufgrund der inhärenten Beugungsbegrenzung können in einem technisch noch so perfekten Lichtmikroskop nur Objekte abgebildet werden, deren geometrische Abmessungen mindestens etwa einer halben Wellenlänge des verwendeten Lichtes entsprechen, also grob etwa  $0,5 \mu\text{m}$ . Dennoch gelang es Christiaan Huygens bereits im Jahre 1677, aufgrund seiner Beobachtungen des Phänomens der optischen Doppelbrechung im Kalkspat ein aus heutiger Sicht weitestgehend richtiges Molekularmodell für ein anisotropes Medium abzuleiten (Abb. 2)<sup>1)</sup>. Damals war das Mikroskop im heutigen Sinne noch nicht entwickelt und Huygens standen nur einige schwach vergrößernde Linsen zur Verfügung. Trotz all seiner Intuition und genialen Fähigkeit, Analogien herzustellen, ist es Huygens selbstverständlich nicht möglich gewesen, Details über den atomaren Kristallaufbau aus seinen Messungen abzuleiten. Dennoch zeigen seine Experimente in exemplarischer Weise, dass strukturelle Information auf atomarer Skala selbst aus der Beobachtung makroskopischer Phänomene abgeleitet werden können. So manifestiert sich die Anisotropie im atomaren

Abb. 3: Schematische Darstellung der Oberfläche eines Festkörpers und Möglichkeiten zur Wechselwirkung der Oberfläche mit einer lokalen Sonde. Die Festkörperoberfläche ist keineswegs beliebig scharf definiert. Nimmt man als Referenzebene beispielsweise die geordnete Lage der obersten Atomkerne, so dehnen sich die inneren gebundenen Elektronen bezüglich dieser Referenzebene um einige pm in Richtung des umgebenden Vakuums aus. Die Ausdehnung der Valenzelektronen beträgt typischerweise ca.  $1\text{\AA}$ . Elektromagnetische Felder, die verantwortlich sind für die van der Waals-Kräfte zwischen zwei Oberflächen, haben immerhin eine Ausdehnung in Richtung des umgebenden Vakuums von einigen nm. Schließlich können statische elektrische und magnetische Felder, je nach Größe der sie verursachenden Quellen im Festkörper, eine Ausdehnung beginnend im atomaren Bereich bis hin zu makroskopischen Größenordnungen haben.

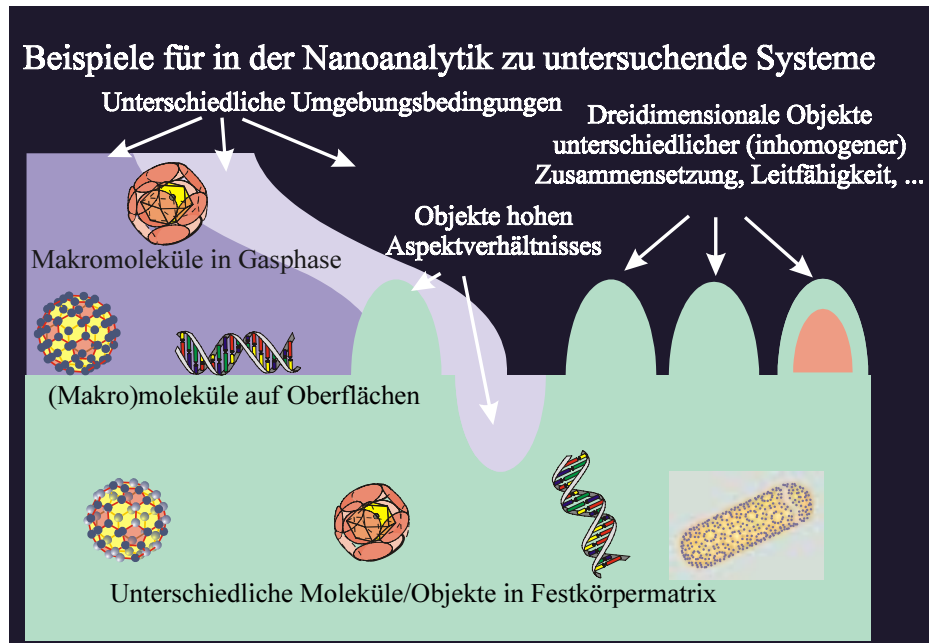


Arrangement in der Doppelbrechung von Licht, dessen Wellenlänge größenordnungsmäßig tausendfach die interatomare Distanz im Kristall übertrifft.

Möglich wird die Deduktion struktureller Detailinformationen aus global gewonnenen Daten dann, wenn hinreichend viele der zu analysierenden Strukturelemente in identischer oder ähnlicher Anordnung mit der flächigen Sonde wechselwirken. Im Falle der Huygens'schen Doppelbrechungsexperimente besteht die globale Sonde im einfallenden Lichtstrahl und die Vielzahl der mit dieser Sonde wechselwirkenden Strukturelemente in der ungeheuren Menge der Elementarzellen etwa des Kalkspatkristalls. Die aus der Doppelbrechung abzuleitende Information über die atomare Struktur des Kristalls ist vergleichsweise gering, da in diesem Fall die Sonde, das sichtbare Licht, bezüglich ihrer inhärenten Eigenschaft, der Wellenlänge, der strukturellen Dimension der Probe, d. h. in diesem Fall den Abmessungen der Elementarzellen, nicht optimal angepasst ist. Verwendet man in einem entsprechenden Experiment Röntgenstrahlen statt sichtbarem Licht, so lassen sich die interatomaren Abstände innerhalb eines Kristalls mit einer Präzision, die Bruchteilen des atomaren Durchmessers entspricht, aus den gebeugten Röntgenstrahlen ableiten. Die Wellenlänge der Röntgenstrahlen ist dem Problem der Bestimmung interatomarer Abstände wesentlich besser angepasst. Dennoch hat auch in einem Röntgenstreuexperiment der Röntgenstrahl einen Durchmesser, der beträchtlich viel größer ist als die Abmessungen der zu analysierenden strukturellen Details.

Beugungs- oder Streuexperimente können zwar mit sub-atomarer Präzision Informationen über strukturelle Details liefern, sind jedoch nicht in der Lage, Informationen über Singularitäten auf atomarer oder nanometrischer Skala zu liefern. Insbesondere können individuelle Nanoobjekte nicht erfasst werden. Zur Vermessung und Analyse derartiger Objekte sind mikroskopische Techniken erforderlich, die eine hinreichend hohe räumliche Auflösung bieten und damit die in Abbildung 1 dargestellten Mechanismen gleichsam in lokaler Weise verwenden. Das benötigte Maß an Lokalisierung wird dabei durch die Größe der zu analysierenden Struktur bestimmt. Abbildung 3 zeigt dies exemplarisch am Beispiel der Oberfläche eines Festkörpers.

Soll ein hypothetisches Mikroskop etwa die Position eines bestimmten Atoms an der Oberfläche vermessen, so muss der Detektor gleichsam bis mindestens in den Bereich der Valenzelektronen an die oberste atomare Lage angenähert werden, da bei größeren Abständen kein Signal mehr gemessen werden



**Abb. 4:** Die dargestellten hypothetischen nanostrukturellen Objekte verdeutlichen die Vielfalt der analytischen Anforderungen in der Nanotechnologie. Individuelle, d. h. nicht in großer Zahl regelmäßig angeordnete Nanoobjekte müssen in der gasförmigen, flüssigen oder festen Phase adressiert werden. Dabei ergibt sich insbesondere die Problematik der räumlichen Vermessung dreidimensionaler Objekte mit hohem Aspektverhältnis oder die Notwendigkeit dreidimensionale Objekte mit inhomogenen funktionalen Eigenschaften zu charakterisieren.

könnte, welches einem einzigen Atom zuzuordnen wäre. Auch die lateralen Abmessungen des Detektors dürften offensichtlich einen atomaren Durchmesser nicht überschreiten. Sollen andererseits beispielsweise Variationen eines magnetischen oder elektrischen Streufeldes an der Oberfläche auf einer Längenskala von 100 nm analysiert werden, so kann dann auch der Detektor seinerseits über entsprechende Dimensionen verfügen und in einem angemessenen Arbeitsabstand von der Probenoberfläche betrieben werden.

## Nanoanalytik als Wegbereiterin der Nanotechnologie

Streu-, Resonanz- und Beugungsmethoden einerseits<sup>2)</sup> sowie mikroskopische Verfahren andererseits<sup>3)</sup> wurden über die vergangenen Jahrzehnte systematisch soweit entwickelt, dass es heute möglich ist, eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften zwischen atomarer und Mikrometerskala zu analysieren. Dennoch stehen wir vor der Situation, dass eine gezielte Nutzung der technischen Möglichkeiten, die sich aus dem sich äußerst rasant entwickelnden Gebiet der Nanotechnologie ergeben<sup>4)</sup>, eine neue Dimension bezüglich der Anforderungen an Verfahren zur Vermessung und Analyse von Nanostrukturen mit sich bringt.

Rein geometrisch bezeichnet die Vorsilbe "nano" den Größenbereich zwischen dem millionsten und dem tausendsten Teil eines

Millimeters. Dieser Bereich wird sowohl durch Einsatz neuer physikalischer Instrumente und Verfahren auf dem Wege einer weiteren Verkleinerung derzeitiger Mikrosysteme erreicht als auch durch Nutzung von Bauplänen der belebten und unbelebten Natur zum selbstorganisierenden Aufbau der Materie. Technologisch äußerst vielversprechende Aspekte entstehen nun daraus, dass es möglich geworden ist, Phänomene auf der Nanometerskala nicht nur deziert zu verstehen, sondern gezielt auch zu beeinflussen<sup>4)</sup>. Gegenstand der Nanotechnologie ist die Nutzung neuer Funktionen, die einerseits auf der geometrischen Größe und andererseits auf den materialspezifischen Eigenheiten von Nanostrukturen basieren. Zur Generierung von Nanosystemen wurden bislang zwei entgegengesetzte Ansätze verfolgt und mit den Methoden der jeweiligen naturwissenschaftlichen Disziplin konsequent optimiert: Einerseits versuchte man, die in der belebten Natur ablaufenden Vorgänge zu verstehen und die gewonnenen Erkenntnisse für technische Fragestellungen zu nutzen. Das wachsende Verständnis von sich selbst organisierenden Strukturen und Funktionseinheiten wurde speziell im Bereich der Biotechnologie, aber auch bei der Entwicklung neuer Materialien angewendet. Andererseits wurde in der unbelebten Natur durch stetig kleiner hergestellte Strukturen<sup>4)</sup> und Grundelemente neuer Materialien<sup>5)</sup> der Weg in die Nanometerdimension eingeschlagen. Dadurch gewonnene Erkenntnisse lieferten wesentliche Beiträge zur Weiterentwicklung insbesondere der Informationstechnologie.



Zukünftig wird das größte Potential für Innovationen aus der Nanowelt in der Kombination der beiden Generierungswege für Nanosysteme gesehen. Damit erhält die Nanotechnologie einen ausgeprägt interdisziplinären Charakter. Die Möglichkeit einer im Idealfall atomaren oder molekularen Kontrolle makroskopischer funktionaler Eigenschaften wird die Herstellung von Materialien, die Entwicklung von Bauelementen der Elektronik, Sensorik, Aktorik oder die Wirkungsweise von Arzneimitteln in einer derart drastischen Weise revolutionieren, dass der Nanotechnologie eine geradezu epochale Bedeutung beigemessen werden muss<sup>6)</sup>.

Während sich die Nanostrukturforschung auf das Verständnis funktionaler Strukturen auf Nanometerskala konzentriert, ist wesentlicher Gegenstand der Nanotechnologie die gezielte Generierung solcher Strukturen bei präzise vorgegebenen funktionalen Eigenschaften. Wesentliche Wegbereiter sowohl der Nanostrukturforschung als auch der Nanotechnologie sind Verfahren, die es ermöglichen, auf Nanometerskala Strukturen geometrisch zu charakterisierung und bezüglich ihrer funktionalen Eigenschaften zu analysieren. Abbildung 4 resümiert schematisch die damit verbundenen sehr komplexen Rahmenbedingungen für zukünftig benötigte nanoanalytische Verfahren.

Neben dem Problem, individuelle Nanoobjekte in der gasförmigen, flüssigen oder festen Phase zu adressieren und deren innere, zum Teil inhomogene Eigenschaften zu charakterisieren, erfordert ein vollständiges Verständnis der funktionalen Eigenschaften einer Nanostruktur in der Regel Untersuchungen auf verschiedenen räumlich-zeitlichen "Eigenschaftsebenen". So sind neben den rein geometrischen Eigenschaften physikalische, chemische und biologische Eigenschaften von Interesse. Darüber hinaus muss häufig die dynamische Entwicklung eines Phänomens betrachtet werden. Allgemein findet also die Analyse einer gewissen Eigenschaft im Orts-Zeit-Kontinuum statt, wobei die örtliche und zeitliche Auflösung des verwendeten analytischen Verfahrens dem zu untersuchenden Phänomen angepasst sein muss. So beginnt unter Umständen der physikalische Alterungsprozess eines Materials irgendwo innerhalb des Materials auf atomarer Skala, schreitet aber vielleicht nur im Verlauf von Jahren so weit voran, dass es zu makroskopischen Konsequenzen kommt. Zur Analyse bietet sich daher ein hinreichend hochauflösendes mikroskopisches Verfahren an, welches jedoch nicht in der Lage sein muss, eine hohe zeitliche Auflösung zu liefern. Betrachtet man hingegen z. B. die dynamische Struktur der Hydrathülle von in Wasser gelösten Ionen, so findet im Mittel die molekulare Reorientierung der

Hydrathülle ein analytisches Verfahren benötigt, welches zwar keine sonderlich hohe Ortsauflösung liefern muss, dafür aber in der Lage ist, die molekulare Reorientierung mit einer zeitlichen Auflösung von  $10^{-14}$  s zu erfassen.

Abbildung 5 zeigt anhand einiger Beispiele exemplarisch, dass heute Verfahren zur Erfassung unterschiedlichster funktionaler Eigenschaften zur Verfügung stehen, die einerseits räumlich eine atomare Auflösung liefern können oder andererseits in der Lage sind, dynamische Prozesse mit einer zeitlichen Auflösung im Femtosekundenbereich zu erfassen. Daneben gibt es selbstverständlich Verfahren, die eine mäßige örtliche Auflösung mit einer mäßigen zeitlichen Auflösung kombinieren und gerade damit einem speziell zu untersuchenden Phänomen optimal angepasste Methoden sind. Hingegen wird aus Abbildung 5 auch deutlich, dass es bislang keine Verfahren gibt, die eine extrem hohe räumliche Auflösung mit der Möglichkeit verbinden, sehr schnelle Vorgänge zu erfassen. Hier wird im Bereich der Methodenentwicklung, forciert durch die neu entstehenden analytischen Bedürfnisse der Nanotechnologie, ein erhebliches Maß an Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten sein. Neben Experimenten zur Vermessung und Analyse von Nanometerstrukturen in einer bestimmten räumlich-zeitlichen Eigenschaftsebene gewinnt die numerische Modellierung von Nanosystemen zunehmend an Bedeutung. Leistungsfähige Rechenverfahren ermöglichen dabei die Simulation des funktionalen Verhaltens auch vergleichsweise komplexer Nanostrukturen, wobei hier insbesondere gerade der Bereich kleinster Strukturen und schnellster Abläufe im Gegensatz zum Experiment häufig am ehesten zugänglich ist.

H<sub>2</sub>O-Moleküle unter Umständen  $10^{14}$  mal in der Sekunde statt. Da dieser Mittelwert für alle gelösten Ionen eines Typs identisch ist, wird für die Charakterisierung des dynamischen

**Abb. 5:** Ein vollständiges Verständnis der funktionalen Eigenschaften einer Nanostruktur erfordert eine Charakterisierung innerhalb verschiedener räumlich-zeitlicher Eigenschaftsebenen. So sind im allgemeinen neben den geometrischen Eigenschaften die physikalischen, chemischen und gegebenenfalls biologischen Eigenschaften von Interesse. Neben der experimentellen Charakterisierung gewinnt gerade im Bereich der Nanostrukturen die Durchführung von (ab initio-) Simulationen aufgrund beträchtlicher Steigerungen in der verfügbaren Rechenleistung zunehmend an Bedeutung. Die Ausdehnung des für die Charakterisierung benötigten räumlich-zeitlichen Kontinuums hängt von der konkreten Problemstellung ab, wobei in der Nanostrukturforschung eine räumliche Auflösung in der Größenordnung eines Atomdurchmessers und eine zeitliche Auflösung bis hin in den Femtosekundenbereich von Interesse sind. Analytische Verfahren überdecken einen Teil des räumlich-zeitlichen Kontinuums in jeweils einer oder mehreren Eigenschaftsebenen. Exemplarisch sind hier nur wenige Verfahren in der geometrischen Eigenschaftsebene angedeutet, wobei die Rasterelektronenmikroskopie (SEM), die Rasterkraftmikroskopie (SFM) und die Rastertunnelmikroskopie (STM) zu den räumlich am höchsten auflösenden Verfahren zählen. Aus der Mitteilung über eine große Anzahl gleichmäßig angeordneter identischer Objekte läßt sich, etwa mittels Beugungsverfahren, ebenfalls ein Aufschluß über strukturelle Details bis hin zur atomaren oder sub-atomaren Skala gewinnen. Die Bestimmung der Eigenschaften singulärer Objekte muß hingegen mittels mikroskopischer, d. h. im Ortsraum genügend hoch auflösender Verfahren erfolgen. Ein besonderer Entwicklungsbedarf besteht bei analytischen Verfahren, die eine maximale räumliche mit einer maximalen zeitlichen Auflösung kombinieren.



## Primäre Einsatzfelder nanoanalytischer Verfahren

Grundsätzlich sind die Einsatzbereiche nanoanalytischer Verfahren ebenso vielfältig wie die Nanostrukturforschung und die Nanotechnologie selbst<sup>7)</sup>. Abbildung 6 zeigt dazu im Überblick die nanotechnologischen Basisdisziplinen Materialentwicklung, Bauelementeentwicklung, chemische und molekularbiologische Verfahren und Metrologie sowie grundsätzlich zu bearbeitende Fragestellungen in diesen Disziplinen.

Ein enormes Anwendungspotential besteht für nanoskalige Materialien. Diese umfassen insbesondere Clusterfestkörper, Multilagensysteme, nanokristalline Materialien sowie Nanophasenmaterialien. Dabei bewegt sich die charakteristische strukturelle Dimension zwischen 1 nm und 100 nm. Die qualitativ neuen und maßschneiderbaren Eigenschaften nanoskaliger Materialien resultieren aus der spezifischen Größe und Zusammensetzung der strukturellen Baueinheiten sowie aus den anteilmäßig enormen Grenzflächen und den Wechselwirkungen der Struktureinheiten über diese Grenzflächen hinweg<sup>8)</sup>. Demzufolge konzentriert sich der Einsatz nanoanalytischer Verfahren primär auf die präzise Bestimmung charakteristischer geometrischer Dimensionen<sup>5)</sup> sowie im funktionalen Bereich auf die Separation der Einflüsse von Grenzflächen- und Volumeneigenschaften.

Nanoskalige Bauelemente mit speziellen elektronischen, magnetischen, optischen, mechanischen oder sensorischen Eigenschaften sind neben den nanoskaligen Materialien bereits in naher Zukunft von enormer Bedeutung für die technologische Weiterentwicklung in Schlüsselbereichen<sup>4)</sup>. Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist hier die Verkleinerung der charakteristischen geometrischen Abmessungen der Bauelemente um etwa einen Faktor 1000 gegenüber Bauelementen der heutigen Mikrosystemtechnologie. Analytische Verfahren werden insbesondere benötigt für die Erforschung der spezifischen Funktionalität der Nanobauelemente sowie für die Qualitätssicherung in Produktionsprozessen. Dabei ist die Möglichkeit der insitu-Analyse während des Betriebs der Bauelemente von grundsätzlicher Bedeutung.

Von nanotechnologisch höchster Relevanz im chemisch-molekularbiologischen Bereich ist die Erforschung grundlegender Eigenschaften funktionaler supramolekularer Systeme. Neue Synthesewege ergeben sich dabei durch Nutzung von Selbstorganisationsphänomenen zur Herstellung neuer Materialien und funktionaler Baugruppen. Im biologisch-pharmakologischen Bereich wird die Erforschung von Mechanismen zur Überwindung biologischer Barrieren völlig neuartige Therapieformen ermöglichen. Während die chemische Spezifität verschiedener analytischer Verfahren global durchaus hohe Nachweissensitivitäten liefert, besteht ein erheblicher Entwicklungsbedarf bei Verfahren, die chemische Spezifität mit molekularer örtlicher Auflösung

kombinieren. Dabei konzentrieren sich analytische Entwicklungen stark auf den lokalen Nachweis von "Schlüssel-Schloss-Wechselwirkungen".

Möglichkeiten zur reproduzierbaren Herstellung und technischen Nutzung von Nanostrukturen erfordern die routinemäßige Verfügbarkeit nanometrologischer Verfahren. Zweifellos wird der Nanometer zukünftig für Genauigkeitsangaben die Bedeutung erlangen, wie sie der Mikrometer derzeit innehat. Dies bedeutet, dass in absehbarer Zeit der Nanometermaßstab auch der Präzisionsstandard für die Materialanalyse und Prüfung werden wird sowie, darauf aufbauend, auch für die Materialbearbeitung.

In Abbildung 6 ist am Beispiel der Entwicklung von Halbleiterbauelementen dargestellt, wie der Forschungs- und Entwicklungsaufwand, beginnend bei ersten Forschungsarbeiten (Phase 5) bis hin zum Eintritt in die Massenproduktion (Phase 1) ansteigt. Im dargestellten Fall beziehen sich die Strukturgrößen auf die lateralen Minimalabmessungen hochintegrierter elektronischer Bauelemente. Verfahren zur Vermessung und Analyse derartiger Bauelemente müssen selbstverständlich schon in der Phase beginnender Forschung verfügbar sein und dienen in der Produktionsphase dann im wesentlichen nur noch der Qualitätssicherung. Dies bedeutet aber, dass bei der Entwicklung nanoanalytischer Verfahren außerordentlich weit vorausschauend gearbeitet werden muss und dass die für die Entwicklungsarbeiten benötigten Mittel relativ kontinuierlich vorgehalten werden müssen. Würde man hier die Forschungsausgaben

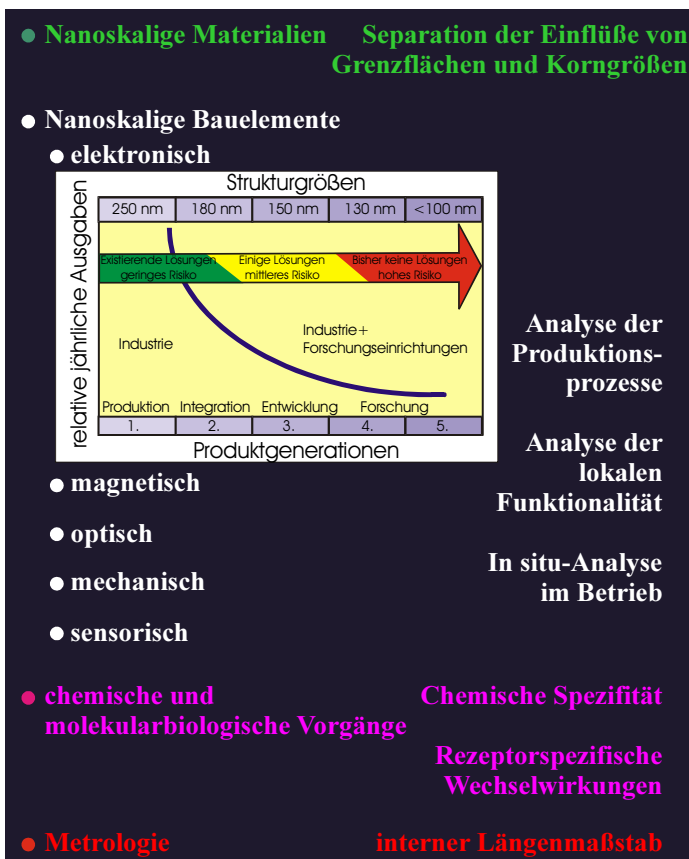
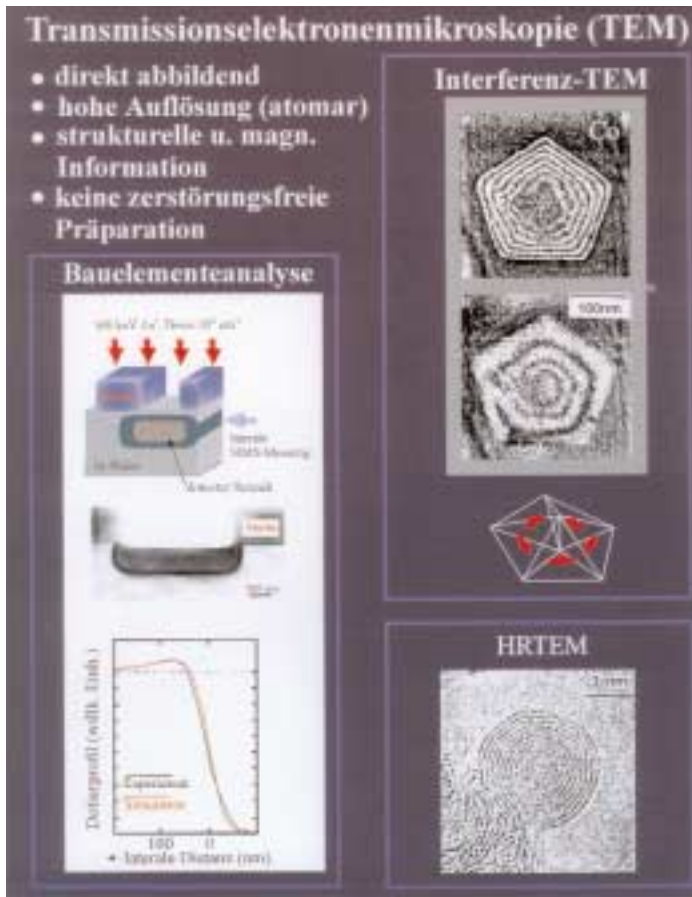


Abb. 6: Nanotechnologische Basisdisziplinen in der Übersicht. Bei der Entwicklung nanoskaliger Materialien und Werkstoffe sind insbesondere analytische Verfahren von Bedeutung, welche die Separation der funktionalen Eigenschaften von Grenzflächen- und Volumenanteilen gestatten. Im Bereich nanoskaliger Bauelemente mit spezifischer elektronischer, magnetischer, optischer, mechanischer oder sensorischer Funktionalität müssen dagegen letztlich angepaßte analytische Verfahren zur Charakterisierung der spezifischen Funktionalität in der Entwicklung sowie dann auch in der Produktion in Form einer on line-Prozesskontrolle zur Verfügung gestellt werden. Von nanotechnologisch höchster Relevanz ist im chemisch-molekularbiologischen Bereich die Erforschung grundlegender Eigenschaften funktionaler supramolekularer Systeme, wobei analytische Verfahren hier insbesondere eine chemische Spezifität mit einer angemessenen räumlichen Auflösung kombinieren müssen. Evident ist ferner, daß die Nanotechnologie völlig neue Anforderungen an metrologische Standards und ihre breite Verfügbarkeit stellen wird, was wiederum entsprechend hoch auflösende Verfahren zur Vermessung von Nanostrukturen zunächst voraussetzt. Grundsätzlich steigt der Entwicklungsaufwand für ein nanotechnologisches Produkt zwischen dem Beginn der ersten Forschungsarbeiten bis hin zum Eintritt in die Massenproduktion stark an. Dies ist am Beispiel der Entwicklung von Halbleiterbauelementen unter Berücksichtigung der minimalen Abmessungen hochintegrierter elektronischer Bauelemente dargestellt. Die Notwendigkeit der Verfügbarkeit geeigneter nanoanalytischer Verfahren verhält sich geradezu antizyklisch zu dieser Entwicklung. Eine Vielzahl analytischer Verfahren wird insbesondere in der Forschungs- und Entwicklungsphase benötigt, während in der Produktionsphase ausschließlich Bedürfnisse der Qualitätssicherung berücksichtigt werden müssen. Dies bedeutet, daß bei der Entwicklung nanoanalytischer Verfahren außerordentlich weit vorausschauend konzipiert werden muß.



**Abb. 7:** Ein wichtiges Standardverfahren in der Nanostrukturforschung ist die Transmissionselektronenmikroskopie. Die Beispiele zeigen die simultane Analyse der morphologischen und magnetischen Eigenschaften eines Kobaltteilchens (oben rechts)<sup>10)</sup>, die Charakterisierung des zwiebelförmigen Aufbaus kleiner Kohlenstoffpartikel mittels der höchstaufösenden Transmissionselektronenmikroskopie (unten rechts)<sup>9)</sup> sowie die Analyse des Dotierungsprofils eines Halbleiterbauelementes in Kombination mit sekundärenionenspektroskopischen Messungen (links)<sup>11)</sup>.

strikt an die momentanen technologischen Bedürfnisse koppeln, könnte die Nanoanalytik nicht in ausreichender Weise als Wegbereiterin der Nanotechnologie fungieren. Die Zusammenhänge, die hier exemplarisch am Beispiel der Entwicklung nanoskaliger elektronischer Bauelemente diskutiert wurden, lassen sich sinngemäß auch auf die anderen in Abbildung 6 dargestellten Basisdisziplinen übertragen.

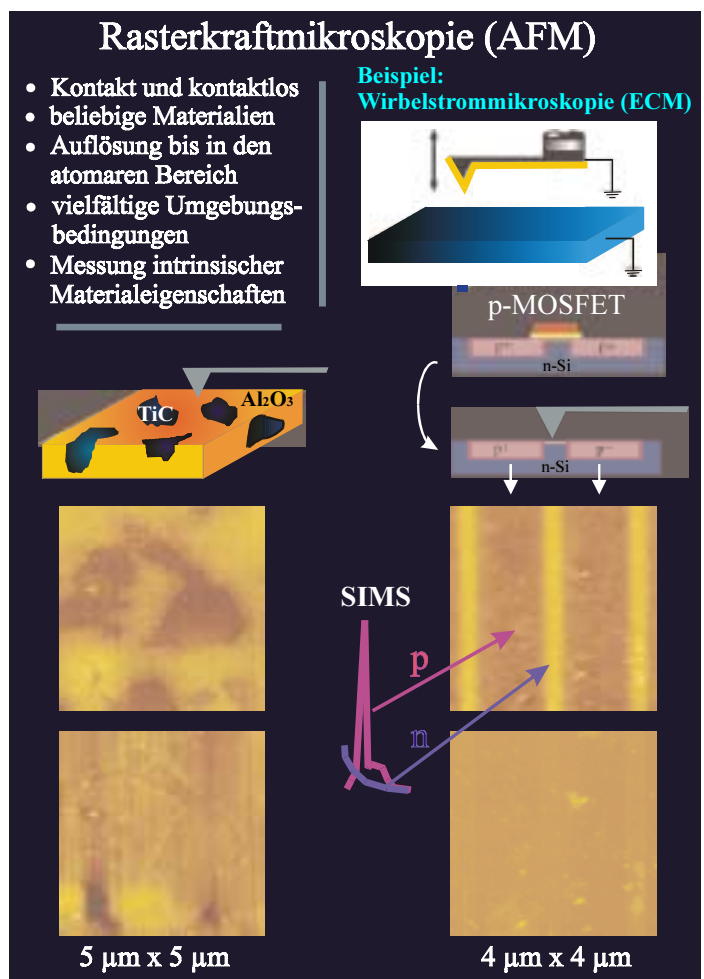
## Status quo der Analytik nanoskaliger Strukturen

Wie bereits erwähnt, steht heute ein ganzes Arsenal hochspezialisierter Verfahren zur Vermessung und Analyse von Nanometerstrukturen zur Verfügung. Als grundsätzlich neue Rahmenbedingung bringen Nanostrukturforschung und Nanotechnologie die Notwendigkeit mit sich, individuelle, d. h. nicht periodisch angeordnete nanoskalige Objekte, analytisch adressieren zu können (siehe Abb. 4). Damit kommt insbesondere den lokalen Verfahren und ihrer Weiterentwicklung eine bevorzugte Bedeutung zu. Abbildung 5 zeigt, dass speziell die Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie sowie die Rastersondenverfahren eine den Bedürfnissen der Nanotechnologie angemessene räumliche Auflösung liefern. Da neben der geometrischen Vermessung von Nanostrukturen aber auch die Charakterisierung unterschiedlichster funktionaler Eigenschaften von Bedeutung ist, lassen sich aussagekräftige Charakterisierungen häufig nur durch Kombination verschiedenartiger Verfahren durchführen. Abbildung 7 zeigt dies am Beispiel der Material- und Bauelementcharakterisierung. Die höchstaufösende

transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme (HRTEM) unten rechts zeigt den zwiebelförmigen Aufbau sphärischer Kohlenstoffpartikel und verdeutlicht, dass HRTEM in der Lage ist, eine atomare oder sogar sub-atomare räumliche Auflösung zu liefern<sup>9)</sup>.

Neben rein strukturellen Informationen lassen sich mittels HRTEM in entsprechenden Betriebsmodi auch bestimmte kooperative und funktionale Phänomene bei höchster örtlicher Auflösung analysieren. Ein entsprechendes experimentelles Resultat erkennt man oben rechts in Abbildung 7 am Beispiel der Korrelation zwischen Struktur und Magnetisierung in einem Kobaltteilchen. Während das obere Teilbild die Dickenkontur des Teilchens widerspiegelt, zeigt das untere Teilbild die korrespondierende Magnetisierungskontur, so dass sich aus beiden Teilbildern gemeinsam die ebenfalls dargestellte komplette geometrische und magnetische Konfiguration des Teilchens deduzieren lässt<sup>10)</sup>. Im linken Teilbild von Abbildung 7 ist schematisch die funktionale Analyse eines siliciumbasierenden Halbleiterbauelementes dargestellt. Hier wurde TEM eingesetzt, um die Schärfe eines p-dotierten Bauelementebereiches zu verifizieren. Da TEM nicht in der Lage ist, eine orts aufgelöste chemische Analyse quantitativ durchzuführen und da im vorliegenden Fall im markierten Bereich das laterale Dotierungsprofil von Interesse ist, wurden die TEM-Aufnahmen mit den Ergebnissen

**Abb. 8:** Die Übersicht zeigt zwei Einsatzmöglichkeiten der Wirbelstrommikroskopie als besondere Variante der Rasterkraftmikroskopie. Da die elektrische Leitfähigkeit mittels des Verfahrens auf lokaler Skala detektiert wird, lassen sich mehrkomponentige Materialien im Detail analysieren (links), was auf der Basis rein topographischer Abbildungen (unten links) in der Regel nicht möglich ist. Bei Halbleiterbauelementen ist die Analyse von Dotierungsprofilen von größtem Interesse. Die Wirbelstrommikroskopie erlaubt hier den Nachweis von Dotierungsvariationen im Inneren des Halbleiters (rechts), wobei im allgemeinen keinerlei Korrelationen zur Oberflächentopographie (unten rechts) bestehen.





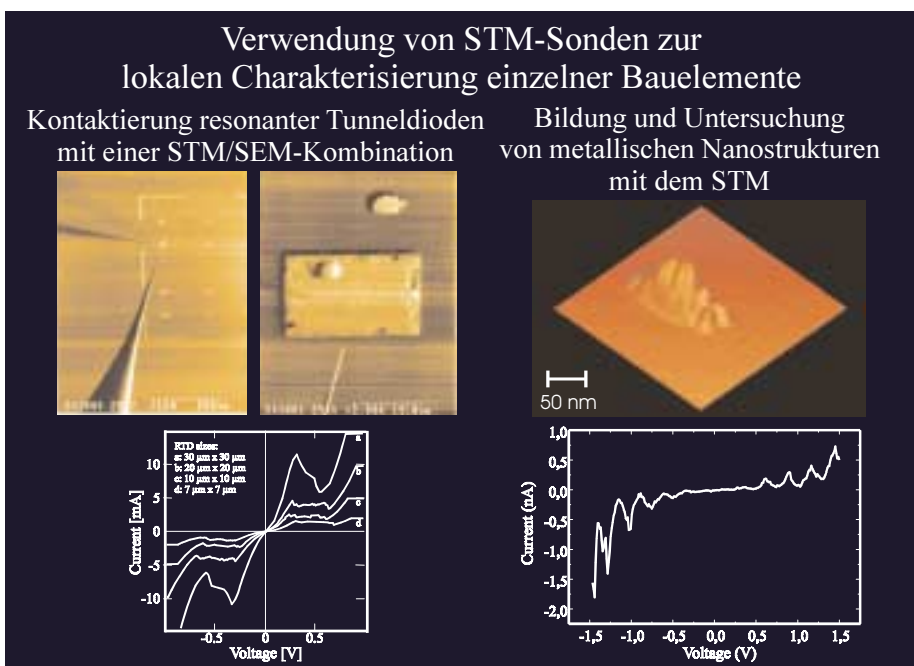
orts aufgelöster Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) korreliert<sup>11)</sup>. Derartige Kombinationsexperimente liefern dann sowohl Informationen über die geometrischen Verhältnisse als auch über in Frage stehende funktionale Eigenschaften, im vorliegenden Fall also über die chemische Zusammensetzung.

Abbildung 5 zeigt, dass aufgrund der hohen erreichbaren Ortsauflösung die Rastersondenverfahren (STM/SFM) vielen Problemstellungen im Bereich der Nanostrukturforschung und Nanotechnologie perfekt angepasst sind<sup>12)</sup>. Dabei sind diese Verfahren keineswegs nur in der Lage, die geometrischen Abmessungen einer Nanostruktur mit höchster Präzision zu erfassen, sondern vielmehr erlaubt die Detektion einer Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen Sonde und Probe (siehe Abb. 1) den Einsatz der Verfahren innerhalb unterschiedlicher Eigenschaftsebenen. So lässt sich beispielsweise, wie in Abbildung 8 dargestellt, die elektronische Leitfähigkeit und ihre lokale Variation auf sub- $\mu\text{m}$ -Skala mittels eines speziellen Verfahrens der Rasterkraftmikroskopie, der Wirbelstrommikroskopie, analysieren<sup>13)</sup>. Dargestellt ist dies für ein Material, bestehend aus einer isolierenden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix mit eingebetteten leitfähigen TiC-Kristalliten. Während das Wirbelstromabtastverfahren hier eine deutliche Information über die Kornstruktur des Materials liefert, ist diese in der topographischen Abbildung (unten links) nur zu erkennen.

Das an der Universität des Saarlandes entwickelte Verfahren ist auch für die Analyse kompletter Bauelemente der Halbleitertechnologie geeignet. Abbildung 8 zeigt dies am Beispiel eines p-dotierten MOS-Feldeffekttransistors der Firma Texas Instruments. Hier konnten die aus der Wirbelstrommikroskopie erhaltenen Dotierungsprofile mit Ergebnissen aus SIMS-Messungen korreliert werden, wobei wiederum die topographische Messung keinerlei Informationen über die örtlich variierende chemische Zusammensetzung des Bauelementes liefert (siehe unten rechts). Da die Wirbelstrommikroskopie a priori und beispielsweise im Gegensatz zu SIMS zudem zerstörungsfrei ist und sich ohne besondere Probenpräparation unter Umgebungsbedingungen anwenden lässt, besteht sicherlich grundsätzlich ein großes Anwendungspotential hinsichtlich verschiedener nanotechnologischer Fragestellung.

Die Rastertunnelmikroskopie (STM) als ultrahochauflösendes Verfahren liefert auf der physikalischen Eigenschaftsebene (siehe Abb. 5) insbesondere Informationen über die lokalen elektronischen Eigenschaften einer Nanostruktur. Eine analytisch besonders leistungsfähige Kombination ergibt sich aus der simultanen Rastertunnel-/Rasterelektronenmikroskopie<sup>14)</sup>. Abbildung 9 zeigt diesbezüglich ein Beispiel aus der Halbleiterbauelementeentwicklung. In den linken Teilbildern ist in den elektronenmikroskopischen Aufnahmen zu erkennen, wie die Spitze des Rastertunnelmikroskops sukzessive einem indi-

**Abb. 9:** Beispiele für den Einsatz des Tunnelmikroskops in der Analyse funktionaler Eigenschaften elektronischer Bauelemente. Das in den linken Teilbildern dargestellte Beispiel zeigt die Verwendung des Rastertunnelmikroskops in Kombination mit einem Rasterelektronenmikroskop, während im rechts dargestellten Beispiel die charakterisierte Struktur (Goldpartikel auf Graphitsubstrat) zunächst direkt mit der Sonde des Tunnelmikroskops deponiert wurde. Wichtig für den Einsatz der Mikro- und Nanobauelemente ist jeweils die resultierende Strom-Spannungskennlinie, die in den unteren Teilbildern dargestellt ist.



**Prof. Dr. Uwe Hartmann**, geb. 1957 in Köln, studierte Physik an der Universität Münster von 1977 bis 1983. Er war als wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Institut für Angewandte Physik tätig und promovierte 1987 mit einer Arbeit über grundlegende physikalische Phänomene in ferromagnetischen Materialien. Als Hochschulsistent am Institut für Angewandte Physik der Universität Gießen begann er dann 1987, sich mit Aspekten der Nanostrukturphysik und insbesondere mit den neuen Verfahren der Rastersondenmikroskopie zu befassen.

Bevorzugte Arbeitsrichtungen hier waren die Untersuchung der lokalen elektronischen Eigenschaften von Supraleitern sowie Grundlagen der Kontrastentstehung in der Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie. 1989 nahm Prof. Hartmann eine Fiebigler-Stelle am Institut für Schicht- und Ionentechnik des Forschungszentrums Jülich an. In der Abteilung Supraleiter-Elektronik beschäftigte er sich hauptsächlich mit Verfahren zur höchstauflösenden Analyse supraleitender, halbleitender und ferromagnetischer Bauelemente auf der Basis von Rastersondentechnologien. Die Habilitation im Fach Experimentalphysik erfolgte an der Universität Gießen 1992. Prof. Hartmann verbrachte zwischenzeitlich verschiedene Forschungsaufenthalte in der Schweiz und in den Vereinigten Staaten.

Seit 1993 ist Prof. Hartmann als Leiter einer Arbeitsgruppe in der Fachrichtung Experimentalphysik der Universität des Saarlandes tätig. Seine bevorzugte Arbeitsrichtung ist die Rastersonden- und Nanostrukturphysik als Grundlage zur Entwicklung ultrakleiner funktionaler Bauelemente.

In den vergangenen Jahren erhielt Prof. Hartmann mehrere Rufe an bundesdeutsche Universitäten und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen. Er ist ständiger Berater verschiedener industrieller Unternehmen im Bereich der Informationstechnologie und Sensorik. 1998 wurde Prof. Hartmann für seine meßtechnischen Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie mit dem renommierten Philip-Morris-Forschungspreis ausgezeichnet.

viduellen, einige  $\mu\text{m}$  großen Bauelement aus einem Feld unterschiedlich großer Bauelemente angenähert wird.

Auf diese Weise lässt sich die exponierte Elektrode des Bauelementes elektrisch kontaktieren. Dies ermöglicht dann die Charakterisierung des Strom-Spannungs-Verhaltens für die einzelnen Bauelemente in Abhängigkeit von den Bauelementeabmessungen. Das Verfahren kann auch übertragen werden auf die Charakterisierung wirklicher Nanobauelemente, wie in den rechten Teilabbildungen der Abbildung 9 dargestellt. Mittels der Sonde eines Rastertunnelmikroskops wurde hier

ein Gold-Nanopartikel auf der Oberfläche eines Graphitsubstrates deponiert. Wird sodann ein Tunnelkontakt zwischen diesem Nanopartikel und der Spitze des Tunnelmikroskops hergestellt, so ergibt sich die unten rechts dargestellte Strom-Spannungs-Kennlinie, die einen ausgeprägten negativen differentiellen Widerstand aufweist, was für verschiedene schaltungstechnische Applikationen von großer Bedeutung ist<sup>15)</sup>.

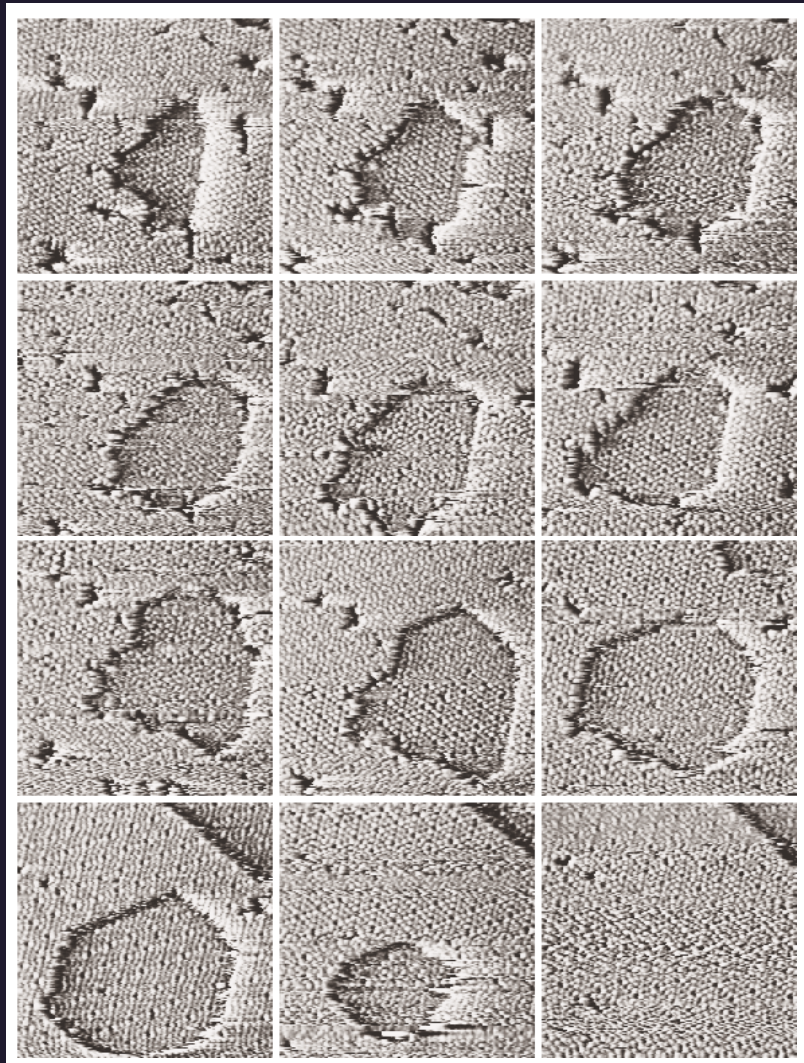
Die Rastertunnelmikroskopie ist in der Lage, unter günstigen Voraussetzungen selbst die atomare Struktur von Oberflächen abbilden zu können. Abbildung 10 zeigt dies am Beispiel von thermisch induzierten Ausheilungsvorgängen auf einer Si(111)(7x7)-Oberfläche, die über einen längeren Zeitraum bei über 700° C im Ultrahochvakuum beobachtet wurde<sup>16)</sup>. Man erkennt einerseits deutlich die markante (7x7)-Oberflächenrekonstruktion des Siliciums und andererseits zwischen dem oberen linken und unteren rechten Teilbild die fortschreitende Ausheilung der Oberfläche, deren Ergebnis nach einigen Minuten eine perfekte Struktur im Abbildungsbereich ist.

Höchstauflösende STM-Abbildungen, wie in Abbildung 10 dargestellt, sind nur unter vergleichsweise günstigen Rahmenbedingungen möglich. Solche Rahmenbedingungen sind im breiten Anwendungsgebiet der Nanotechnologie nur in absoluten Ausnahmefällen gegeben. Darüber hinaus wurde bereits diskutiert, dass die hochauflösenden mikroskopi-

**Dr. Ulrich Memmert**, geb. 1959, studierte Physik in Berlin und Marburg. Er promovierte 1986 in Marburg mit einer Arbeit zur Kernspinresonanz an auf Einkristalloberflächen adsorbierten Atomen. Nach Aufenthalten an der University of Western Ontario in Kanada, dem IBM T.J. Watson Research Center in den USA, den Universitäten München und Ulm und am Forschungszentrum Jülich wechselte er 1998 in die Fachrichtung Experimentalphysik der Universität des Saarlandes.

Sein Arbeitsgebiet ist die Untersuchung physikalischer und chemischer Prozesse an Festkörperoberflächen, wobei als experimentelle Verfahren insbesondere die verschiedenen Methoden der Rastersondenmikroskopie Verwendung finden. Die derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich auf Fragestellungen aus der Informationstechnologie, z.B. zur Prozessierung von halbleitenden Materialien wie Silicium oder Galliumarsenid, zur Prozessierung von Hochtemperatursupraleiterschichten und zum Magnetismus dünner metallischer Schichten.

## In situ-Beobachtung von Prozessen mit dem STM Ausheilen der Si(111) (7x7)-Oberfläche bei 1000 K Zeit zwischen Abbildungen: 15 s



30 nm x 30 nm

**Abb. 10:** Mittels STM beobachtete thermisch induzierte Ausheilung einer Silicioberfläche. Die Abbildung zeigt von links oben nach rechts unten fortschreitend die Entwicklung der atomaren Oberflächenkonstellation.

schen Verfahren keineswegs die einzige Möglichkeit zur Aufklärung von Nanostrukturen darstellen, sondern dass vielmehr bei Vorliegen periodischer Ensembles der Nanostruktur auch Beugungsverfahren über die Erfassung entsprechender Ensemble-Mittelwerte in erheblichem Maße zur Nanoanalytik beitragen können. Eines der wohl historisch spektakulärsten Beispiele für eine Strukturauflösung im molekularen und Nanometerbereich ist in Abbildung 11 dargestellt. Die detaillierte Aufklärung des DNA-Moleküls und die Verifikation seiner charakteristischen Helix-Struktur erfolgte durch Auskristallisation eines genügend großen DNA-Ensembles und anschließende röntgenkristallographische Untersuchung<sup>17)</sup>.

Heute ist es möglich, mittels Rastersondenverfahren auf Substraten deponierte DNA-Stränge routinemäßig abzubilden (Abb. 11, rechts). Da aber die Sonden weder eine ausgeprägte chemische Spezifität haben noch alle Bereiche der Helix-Struktur zugänglich sind, ist wohl auszuschließen, dass man bei ausschließlicher Verfügbarkeit von Rastersondenverfahren jemals zu einer vollständigen Strukturaufklärung der DNA gekommen wäre. Dies zeigt, dass sehr häufig eine Kombination von Streu- oder Beugungsverfahren, hochauflösenden mikroskopischen Verfahren und ggf. weiteren globalen Verfahren erst zu einer vollständigen Charakterisierung der funktionalen Eigenschaften einer Nanostruktur führt.



Abb. 11: Die detaillierte Aufklärung der Struktur des DNA-Moleküls erfolgte über Auskristallisation eines Ensembles und röntgenkristallographische Charakterisierung (linker Abbildungsbereich)<sup>17)</sup>. Die Abbildung von DNA-Strängen mittels Rastersondenmikroskopie liefert zwar räumlich hochaufgelöste Bilder, ermöglicht jedoch aufgrund der fehlenden chemischen Spezifität der Sonden keinerlei Aufklärung molekularer Details oder gar funktionaler Eigenschaften (rechter Abbildungsbereich).

Ein Beispiel dafür, wie vielfältig die Nanoanalytik in Kombination verschiedenster Verfahren gerade an biologischen Objekten betrieben werden kann, zeigt Abbildung 12.

Bei der biochemischen Analyse genetischen Materials aus Chromosomen ist es von großer Bedeutung, einerseits den zu analysierenden Bereich in Bezug auf seine Lokalisierung innerhalb des Chromosoms möglichst genau zu definieren und andererseits diesen so definierten Bereich auf seine Ausdehnung, d. h. letztendlich auf die beteiligten Basenpaare möglichst stark einzuschränken. Durch die schon erwähnte Beugungsbegrenzung sind hier bei der Verwendung konventioneller Lichtmikroskope in Kombination mit einer Fluoreszenzmarkierung genetischer Bereiche physikalische Grenzen bei der Lokalisierung gesetzt.

Als spezielle Variante der Rastersondenmikroskopie erlaubt die optische Rasternahfeldmikroskopie (SNOM) simultan die Erfassung topographischer und optischer Konturen bei sub-Wellenlängenauflösung. So kann, wie üblich, ein chromosomaler Bereich fluoreszierend markiert werden. Die Fluoreszenzsignale lassen sich dann mittels SNOM örtlich hochauflösend detektieren und mit der topographischen Kontur des gesamten Chromosoms korrelieren. Im Vergleich zur konventionellen Fluoreszenzaufnahme (oben rechts in Abb. 12) wird die wesentlich bessere örtliche Auflösung der Fluoreszenzsignale im SNOM-Bild deutlich. Die spitzenförmige Sonde des Rasternahfeldmikroskops lässt sich bei genügender Annäherung an die Oberfläche auch als Werkzeug zur lokalen Extraktion genetischen Materials verwenden. Dieses Material kann dann zur weiteren biochemischen Analyse dienen, wobei der Vorteil gegenüber bisherigen Verfahren darin liegt, dass sich das extrahierte genetische Material in Bezug auf Umfang und Lokalisierung innerhalb des Chromosoms mittels des Nanoextraktionsverfahrens bedeutend genauer definieren lässt. Grundlegende Arbeiten zur Entwicklung des in Abbildung 12 dargestellten SNOM-Verfahrens werden zur Zeit an der Universität des Saarlandes in einer Kooperation zwischen dem Molekularbiologischen Labor der Unfallchirurgie und der Fachrichtung Experimentalphysik durchgeführt.

## Ausblick

Es steht heute eine ganze Palette hochgradig spezialisierter Verfahren zur Vermessung der Geometrie und zur Charakterisierung verschiedenster funktionaler Eigenschaften von Nanostrukturen zur Verfügung. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen globalen Verfahren, wie Beugungs-, Streu- und Resonanzverfahren, und lokalen, d. h. mikroskopischen Methoden. Während globale Verfahren die Charakterisierung einer Nanostruktur in Form entsprechender Ensemble-Mittel-

Abb. 12: Einsatz der optischen Rasternahfeldmikroskopie in der genetischen Diagnostik. Chromosomale Bereiche werden mittels eines Fluoreszenzfarbstoffes markiert. Die optische Rasternahfeldmikroskopie erlaubt dann die simultane Abbildung der chromosomalen Topographie und der fluoreszierend markierten Bereiche (Teilabbildungen links). Sodann wird mit der Sonde des Mikroskops Material aus den markierten Bereichen entnommen und der biochemischen Analyse zugeführt (Teilabbildungen Mitte und rechts). Der Vorteil gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise (die rechte obere Abbildung zeigt ein konventionelles Fluoreszenzbild) besteht darin, daß die Anzahl der analysierten Basenpaare aufgrund der hohen Auflösung von SNOM minimiert werden kann.

## Spezifische Probleme der Nanoanalytik

**Grundsätzliche Limitierungen (z.B. Wellenlängen, ..)**  
**Zerstörungsfreiheit**  
**Empfindlichkeit (Untersuchung von Einzelobjekten)**

### Beispiel: Untersuchung der DNA

**Auskristallisation eines Ensembles, Röntgenkristallographische Untersuchung**



**Untersuchung von Einzelobjekten, z.B. mit dem Rastertunnelmikroskop**



Substrat




## Optische Rasternahfeldmikroskopie (SNOM)

- Sub-Wellenlängen-Auflösung
- Varianten der konventionellen Lichtmikroskopie
- Vielfältige Umgebungsbedingungen
- Moderater präparativer Aufwand
- Simultaner Erhalt topographischer und optischer Information

### Beispiel: Genetische Diagnostik

**FISH**



**Konventionelle Fluoreszenzmikroskopie**



→

**SNOM**



**Topographie**



1 µm

**Fluoreszenz + Topographie**



**Nanoextraktion**



**PCR**



werte ermöglichen, liefern die mikroskopischen Verfahren einen direkten Zugriff auf das individuelle Objekt. In der Regel erfordert die vollständige Charakterisierung geometrischer und funktionaler Eigenschaften den Einsatz verschiedener komplementärer Techniken.

Nanostrukturforschung und Nanotechnologie basieren in ihrer zukünftigen Entwicklung entscheidend auf der Verfügbarkeit geeigneter analytischer Methoden, wobei aus der Möglichkeit des direkten Zugriffs auf die elementaren Bausteine der belebten und unbelebten Materie eine Reihe nicht nur quantitativer sondern auch qualitativ neuer Ansprüche an die Verfügbarkeit analytischer Verfahren resultiert. Häufig ist dabei in der Tat die Adressierbarkeit einer bestimmten Probenkoordinate oder eines singulären nanoskaligen Objektes von großer Bedeutung, so dass viele Bereiche in der Nanotechnologie direkt durch die Entwicklung der Rastersondenverfahren stimuliert wurden. Rastersondenverfahren sind bereits heute, häufig in Kombination mit globalen Verfahren, die wichtigsten Wegbereiter der Nanotechnologie. Dies wird in noch stärkerer Maße für die Zukunft gelten. Wesentliche methodische Entwicklungen im Bereich der Rastersondenverfahren konzentrieren sich daher darauf, etablierte globale oder auch lokale Verfahren mit unzulänglicher räumlicher Auflösung gleichsam auf den atomaren oder molekularen Maßstab herunter zu skalieren. Exemplarisch seien hier etwa rastersondenmikroskopische Ansätze erwähnt, die es in Zukunft möglich machen könnten, Kernspinresonanz-Experimente mit atomarer Ortsauflösung durchzuführen.

Eine ausgesprochen wichtige Rahmenbedingung dafür, dass die Nanoanalytik zukünftig ihre Schlüsselrolle als Wegbereiterin der Nanotechnologie in ausreichendem Maße wahrnehmen kann, leitet sich daraus ab, dass geeignete analytische Verfahren bereits zur Verfügung stehen müssen, wenn mit der Grundlagenforschung zur Entwicklung nanotechnologischer Produkte begonnen wird. Dies bedeutet, dass die Methodenentwicklung im

Bereich der Nanoanalytik ausgesprochen vorausschauend und weitsichtig betrieben werden muss. Diese Notwendigkeit wurde auf forschungspolitischer Ebene klar erkannt. So wurde vor wenigen Wochen seitens des BMBF die Einrichtung eines überregionalen Kompetenzzentrums für die Vermessung und Analyse von Nanostrukturen bewilligt.

Das Kompetenzzentrum, an dem die Universität des Saarlandes maßgeblich beteiligt sein wird, wird sich in den kommenden Jahren forciert auf die methodische Entwicklung von den Bedürfnissen der Nanotechnologie angepassten Verfahren konzentrieren. Darüber hinaus werden in einer im Bereich der Analytik bislang nicht vorhandenen Weise Schulungs-, Fortbildungs- und Transfermaßnahmen direkt mit der aktiven Grundlagenforschung im Bereich der Nanoanalytik vernetzt werden, so dass durch die Einrichtung des Kompetenzzentrums ein erheblicher zusätzlicher Impuls für das sich ohnehin schon rasant entwickelnde Gebiet der Nanostrukturanalytik erwartet werden darf.

## Literatur

- 1) C. Huygens, *Traité de la lumière*, 1690; Transkription: Abhandlungen über das Licht, Ostwalds Klassiker Nr. 20, Leipzig, 1930
- 2) D. J. O'Connor, B. A. Sexton, and R. St. C. Smart (Eds.), *Surface Analysis Methods in Materials Science*, Springer Series in Surface Sciences 23 (Springer, Berlin, 1992)
- 3) S. Amelinckx, D. Van Dyck, J. van Landuyt, and G. van Tendeloo (Eds.), *Handbook of Microscopy* (VCH, Weinheim, 1997)
- 4) U. Hartmann, Auf der Schwelle zur Nanotechnologie, *Magazin Forschung* 2, 45 (1996) und 1, 2 (1997)
- 5) siehe z. B.: R. Hempelmann, Nanokristalline Metalle und Oxide mit kontrollierter Teilchengröße, *Magazin Forschung* 1, 8 (1998)

6) J. Rüttgers, Nanotechnologie: Tiefgreifende Innovation und kühne Vision, Rede zur Eröffnung des BMBF-Workshops Nanotechnologie (Bonn, 3.3.1998); [www.nanonet.de](http://www.nanonet.de)

7) G. Bachmann, Technologieanalyse Nanotechnologie, VDI-TZ/BMBF, Analyse und Bewertung zukünftiger Technologien - Band 5, 1994

8) Arbeits- und Ergebnisbericht 1994-1997 zum SFB 277: Grenzflächenbestimmte Materialien: Synthese, Charakterisierung, physikalische Eigenschaften, Modelle, Universität des Saarlandes

9) D. Ugarten and W. A. de Heer, in: H. Kuzmany, J. Fink, M. Mehring, and S. Roth (Eds.) *Electronic Properties of Fullerenes*, Springer Series in Solid State Sciences 117, (Springer, Berlin, 1993)

10) A. Tonamura, *Electron Holography*, Springer Series in Optical Sciences 70, (Springer, Berlin, 1993)

11) R. V. Criegern, F. Jahnel, M. Bianco, and R. Lange-Gieseler, *J. Vac. Sci. Technol. B* 21, 234 (1994)

12) U. Hartmann, Rastersondentechnologie, *Magazin Forschung* 1, 26 (1995)

13) B. Hoffmann, R. Houbertz, and U. Hartmann, *Appl. Phys. A* 66, S 409 (1998)

14) U. Memmert, U. Hodel, and U. Hartmann, *Rev. Sci. Instrum.* 67, 2269 (1996)

15) R. Houbertz, U. Weber, and U. Hartmann, *Appl. Phys. A* 66, S 149 (1998)

16) A. Feltz und U. Memmert, unveröffentlichte Daten, Universität München (1992)

17) M. H. F. Wilkins and J. T. Randall, *Biochim. et Biophys. Acta* 10, 192 (1953)

## Ihr Direktkontakt zur praxisnahen Forschung



**Kontaktstelle für Wissens- und Technologietransfer**

Telefon 0681/302-2656 Fax 0681/302-4142  
E-mail: [kwat@rz.uni-sb.de](mailto:kwat@rz.uni-sb.de)