

Einblick in die Welt der Atome

Ernst Ruska-Centrum für Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen

AN INITIATIVE OF

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Inhalt

Vorwort	Seite 1
Leistungsfähigkeit der Elektronenmikroskopie Einzigartige Einblicke in die Nanowelt	Seite 2
Interview mit den Direktoren des Ernst Ruska-Centrums „Tiefes Verständnis“	Seite 4
Elektronenmikroskopie im Einsatz Der Schlüssel zu Innovationen	Seite 8
Aberrationskorrekturen und Software Das Know-How hinter den höchstauflösenden Elektronenmikroskopen	Seite 10
Interview mit Prof. Knut Urban Pionier der atomaren Elektronenmikroskopie	Seite 13
Nutzerzentrum Wissenschaft und Industrie profitieren	Seite 15
Interview mit Markus Wild, Firma FEI Lohnende Zusammenarbeit	Seite 16
Mitarbeiter ER-C	Seite 17



Vorwort

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg, Rektor der RWTH Aachen (l.),
und Prof. Dr. Achim Bachem, Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Jülich.*

Die Mikroskopie steht für einen entscheidenden Durchbruch der modernen Wissenschaften. Seit Beginn des 17. Jahrhunderts nutzten sie Forscher, um Dinge sichtbar zu machen, die dem menschlichen Auge bis dahin nicht zugänglich waren. Das Ernst Ruska-Centrum (ER-C) für Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen steht für den Fortschritt dieser bildgebenden Verfahren.

Die Höchstleistungselektronenmikroskope des ER-C ermöglichen einzigartige Einsichten in die Welt der Atome. Diese Einsichten sind ein Schlüssel zu Innovationen vor allem in der Materialforschung und in der Nanotechnologie, weil das Zusammenspiel einzelner Atome die Eigenschaften von Werkstoffen und Bauelementen bestimmt. Materialforschung und Nanotechnologie wiederum werden wesentlich sein, um die großen Fragen unserer globalen Gesellschaft zu beantworten: Wie können wir trotz endlicher Rohstoffe unsere Zukunft nachhaltig gestalten? Wie können wir unseren Energieverbrauch klimafreundlich decken? Wie können wir energieeffizient kommunizieren und Wissen austauschen?

Solche drängenden Herausforderungen treiben auch die Jülich Aachen Research Alliance JARA an. Diese strategische Partnerschaft von RWTH Aachen und Forschungszentrum Jülich steht für eine neue Qualität der Zusammenarbeit einer Hochschule mit einer außeruniversitären Forschungseinrichtung. Das

ER-C, das 2004 gegründet wurde, ist ein nicht wegzudenkender Teil dieser deutschlandweit einzigartigen Allianz. Und es war ein leuchtendes Beispiel für die JARA, als diese 2007 an den Start ging. Es zeigte, wie erfolgreich Bemühungen sein können, institutionelle Hürden zwischen Großforschungseinrichtungen und Hochschulen abzubauen, Forschungsziele gemeinsam zu definieren und Investitionen zusammen zu tätigen.

Das ER-C steht aber nicht nur den Forschern in Aachen und Jülich offen. Es ermöglicht Wissenschaftlern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie den Zugang zu den leistungsfähigsten Elektronenmikroskopen unserer Zeit. 50 Prozent der Nutzungszeit stehen die Geräte diesen externen Wissenschaftlern zur Verfügung. Das entspricht einer Vereinbarung mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), einem wichtigen Förderer des ER-C. Sie benennt auch das Gremium, das die Anträge der externen Wissenschaftler begutachtet. Dieses Konzept des ER-C als erstes nationales Nutzerzentrum für höchstauflösende Elektronenmikroskopie hat sich außerordentlich bewährt. Mit dem neuen Supermikroskop PICO im neuen Gebäude sind alle Weichen dafür gestellt, dass das ER-C weiter seine internationale Spitzenstellung einnehmen kann.

E. Schmachtenberg *A. Bachem*
Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg Prof. Dr. Achim Bachem

Einzigartige Einblicke in die Nanowelt

Die Anordnung der Atome – die atomare Struktur – ist wesentlich für die elektrischen, mechanischen, optischen und magnetischen Eigenschaften eines Materials. Struktur und Zusammenspiel der Atome bestimmen somit auch, zu welchen Zwecken sich Werkstoffe und Nanometer-kleine Bauelemente einsetzen lassen und wie leistungsfähig sie sind. Daher ist es für den wissenschaftlichen und technologischen Fortschritt sehr wichtig, die Details der atomaren Welt abbilden und untersuchen zu können. Die besten Elektronenmikroskope unserer Zeit ermöglichen das.

Ein kleines Gedankenexperiment macht deutlich, in welche winzige Dimension Wissenschaftler mit den modernsten Elektronenmikroskopen vordringen: Um die Atome in einem Haar – Durchmesser: rund 1/20 Millimeter – sichtbar zu machen, müsste man seine Querschnittsfläche zunächst auf die Maße eines Fußballfeldes vergrößern. Die Dicke der Grashalme des Feldes entspricht dann dem Durchmesser eines Atoms.

Herkömmliche Lichtmikroskope können zwar Bakterien scharf abbilden, aber

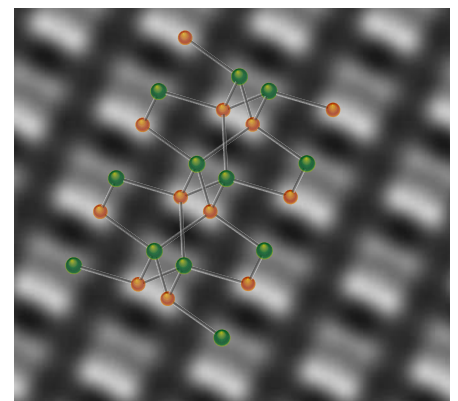
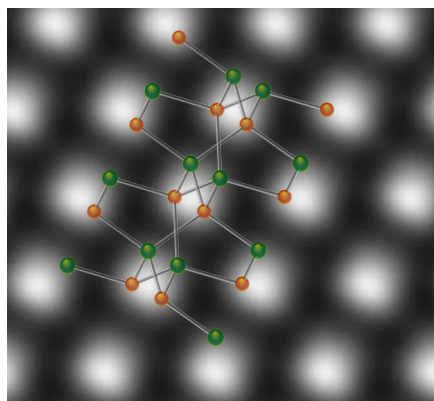
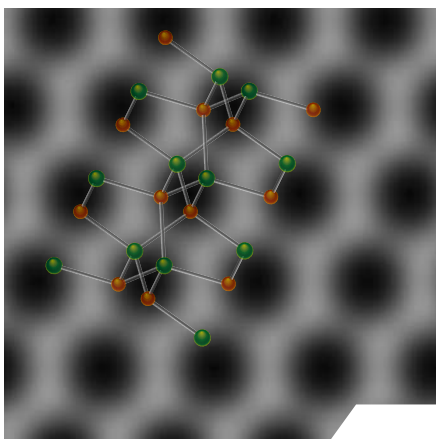
Die Dimension der Längeneinheiten

Meter	Eins	10^0	1
Millimeter	Ein Tausendstel	10^{-3}	0,001
Mikrometer	Ein Millionstel	10^{-6}	0,000 001
Nanometer	Ein Milliardstel	10^{-9}	0,000 000 001
Picometer	Ein Billionstel	10^{-12}	0,000 000 000 001

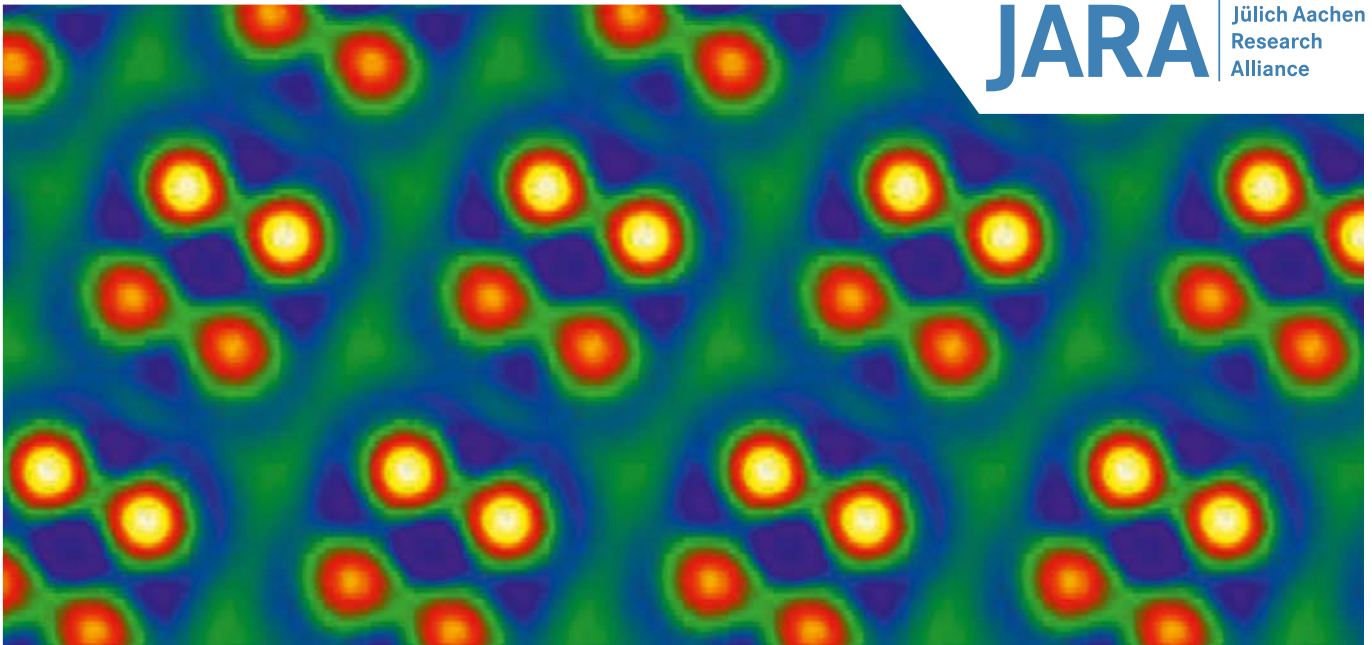
nicht die rund zehntausendfach kleineren Atome. Der Grund: Die Wellenlänge des Lichts begrenzt das Auflösungsvermögen der Geräte. Dieses Auflösungsvermögen ist ein Maß dafür, wie weit Punkte beispielsweise in einem Präparat

voneinander entfernt sein dürfen, um noch getrennt voneinander abgebildet zu werden.

Elektronenmikroskope verwenden Elektronen statt Licht. Der Elektronenstrahl



Diese simulierten Aufnahmen von Aluminiumnitrid verdeutlichen, wie sich mit jeder Elektronenmikroskop-Generation von 1992 über 1998 und 2005 bis heute (v.l.n.r.) das Auflösungsvermögen verbessert hat.



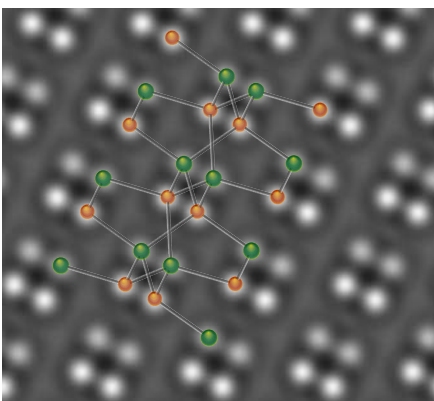
wird dabei durch magnetische Felder gebündelt, die somit die Funktion der Glaslinsen im Lichtmikroskop übernehmen. Die Wellenlänge der Elektronen ist so klein, dass die Abbildung von Atomen problemlos möglich sein sollte. Nach der Erfindung der Elektronenmikroskopie in den 1930er Jahren gelang es trotzdem Jahrzehnte lang nicht, Atome sichtbar zu machen. Ursache dafür waren Linsenfehler, sogenannte Aberrationen, die sich nicht korrigieren ließen. Denn auf der Basis rotationssymmetrischer magnetischer Felder lassen sich nur Sammellinsen, aber keine Zerstreuungslinsen für Elektronen-

wellen bauen. Im Lichtmikroskop dienen Zerstreuungslinsen dazu, die Fehler der Sammellinsen zu kompensieren.

In den 1990er Jahren fanden Forscher der Technischen Universität Darmstadt, des Europäischen Molekularbiologischen Laboratoriums in Heidelberg und des Forschungszentrums Jülich einen Ausweg aus dem Dilemma. Sie entwickelten einen Korrektur, der die Wirkung des Öffnungsfehlers – Fachsprache: die sphärische Aberration (s. S. 10) – beheben konnte. Das weltweit erste entsprechende Durchstrahlungselektronenmikroskop nahm in Jahr 1998 im Forschungszentrum Jülich den Betrieb auf. Dieser Prototyp steht heute im Ernst Ruska-Centrum (ER-C). Ab 2004 kamen die ersten kommerziellen Geräte auf den Markt, die mit Korrektoren für die sphärische Aberration ausgestattet waren. Nach und nach boten alle führenden Unternehmen der elektronenoptischen Industrie die neue Gerätegeneration an. Am ER-C wurden 2006 zwei entsprechende Geräte des Typs TITAN 80–300™ der niederländisch-amerikanischen Firma FEI installiert. Sie können atomare Strukturen mit einer Auflösung von 80 Pikometern abbilden.

2011 erhielt das ER-C das Durchstrahlungselektronenmikroskop PICO, dessen Auflösungsvermögen rund 50 Pikometer beträgt. Es ist eines von derzeit weltweit nur zwei Geräten, die neben der sphärischen Aberration noch einen weiteren unvermeidlichen Linsenfehler – die chromatische Aberration (s. S. 11) – korrigieren können. Dadurch verbessert sich neben der Auflösung auch die Genauigkeit, mit der sich Atomabstände und Atomverschiebungen messen lassen, von fünf Pikometern auf lediglich einen Pikometer.

Mit PICO können die Wissenschaftler des ER-C und externe Nutzer nun tatsächlich bis zur physikalischen Grenze der Elektronenoptik in den Nanokosmos vorstoßen. Allerdings nicht zum Selbstzweck: Um Bauteile der Nanoelektronik und Nanotechnologie zu kontrollieren und zu optimieren, muss man sie im Pikometerbereich analysieren können. Wissenschaftler benötigen möglichst präzise Einblicke in die Welt der Atome und die dort ablaufenden Prozesse, wenn sie gezielt eingreifen und so neue Materialien beispielsweise für die Informationstechnologie und die Energietechnik entwickeln wollen.



Erst mit PICO ist die Anordnung der Atome tatsächlich zu erkennen, die zur Verdeutlichung als grüne und rote Kugeln eingezeichnet sind.



Prof. Rafal Dunin-Borkowski (l.) und Prof. Joachim Mayer

Rafal Dunin-Borkowski ...

... kam 2011 ans Forschungszentrum Jülich. Dort leitet er das Institut für Mikrostrukturforschung im Peter Grünberg Institut. Zugleich ist er Direktor am ER-C. Davor war der Brite Gründungsdirektor des Center for Electron Nanoscopy an Dänemarks Technischer Universität in Lyngby.

Joachim Mayer ...

... ist Universitätsprofessor für das Fach Mikrostrukturanalytik und Leiter des Gemeinschaftslabors für Elektronenmikroskopie der RWTH Aachen. Seit der Gründung des Ernst Ruska-Centrums im Jahr 2004 ist er dort einer von zwei Direktoren.

„Tiefes Verständnis“

Interview mit den Direktoren des Ernst Ruska-Centrums.

Es gibt eine Vielzahl von Methoden, mit denen sich Wissenschaftler Informationen über den Aufbau der Welt im Bereich von Mikro- und Nanometern verschaffen. Was kann die Elektronenmikroskopie, was andere Methoden nicht können?

Mayer: Das Elektronenmikroskop wurde einst erfunden, um die Beschränkungen der Lichtmikroskopie zu überwinden. Tatsächlich könnte man einen Transistor, wie er in heute üblichen Laptops eingebaut ist, mit einem Lichtmikroskop nicht abbilden, weil er dafür zu klein ist. Und man könnte mit einem Lichtmikroskop beispielsweise auch nicht die Defekte sichtbar machen, die – wenn

sie sich ausbreiten – für das plastische Verformen vieler Werkstoffe verantwortlich sind. Dies sind nur zwei Beispiele dafür, dass man Elektronenmikroskope braucht, um die Funktion von Bauelementen oder die Eigenschaften von Materialien zu ergründen.

Dunin-Borkowski: Die Durchstrahlungselektronenmikroskopie liefert Informationen über die innere Struktur von Materialien. Damit unterscheidet sie sich beispielsweise von der Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie. Diese zwei Methoden sind ebenfalls sehr gebräuchlich, um die Nanowelt zu erkunden, bilden aber nur die Oberfläche von Materialien ab.

Man kauft sich also möglichst gute Elektronenmikroskope, präpariert eine Materialprobe und erhält dann die Informationen, die man braucht. Ist es wirklich so einfach?

Dunin-Borkowski: Nein. Die hochauflösende Elektronenmikroskopie ist keinesfalls eine Technik, die auf Knopfdruck perfekt funktioniert. So ist auch ein Gerät der Spitzenklasse nicht der Garant dafür, dass man Spitzenforschung betreibt. Man benötigt sehr viel Wissen und Know-how, um Bilder zu erhalten und zu interpretieren. Das ist übrigens ein wesentliches Charakteristikum des Ernst Ruska-Centrums: Wir entwickeln die Methoden rund um die

Korrektur von Linsenfehlern und zur Bildinterpretation weiter. Es gibt weltweit sehr wenige Zentren, die in diesen Bereich so viel investieren. Wir haben hier erfahrene Wissenschaftler mit einem tiefen Verständnis von Elektronenoptik und Quantenmechanik.

Wieso benötigt man so viele theoretische Kenntnisse unter anderem der Quantenmechanik?

Mayer: Wenn im Mikroskop die Elektronen auf die Probe treffen, so ist ihre Wechselwirkung mit der Materie quantenmechanischer Natur. Man braucht also die Quantenmechanik, um elektronenmikroskopische Untersuchungen quantitativ – also zahlenmäßig korrekt und vollständig – auszuwerten.

Dunin-Borkowski: Hinzu kommt: In einem Mikroskop, in dem die Linsenfehler korrigiert werden, passieren die Elektronen ein sehr kompliziertes System magnetischer Pole, die von Hunderten Stromversorgungseinheiten kontrolliert werden. Man muss also wissen, wie genau die Elektronen von diesen Elementen beeinflusst werden, um die Qualität des Bildes zu verbessern, das mit Hilfe dieser Elektronen erzeugt wird.

Was erwarten Sie sich von PICO, einem von zwei Elektronenmikroskopen weltweit, bei dem auch die chromatische Aberration korrigiert wird?



Mitarbeiter aus dem Team des ER-C (v.l.): Dr. Karsten Tillmann, Dr. Juri Barthel, Marita Schmidt und Dr. Andreas Thust.

Dunin-Borkowski: Nachdem Elektronenmikroskope verfügbar wurden, die die sphärische Aberration korrigierten, wurden im Ernst Ruska-Centrum Methoden entwickelt, die die zuverlässige Auswertung der höchst aufgelösten Bilddaten erst ermöglichten. Nun haben wir mit PICO ein Elektronenmikroskop, bei dem auch die chromatische Aberration korrigiert wird – und wir erwarten, dass wir die Erfolgsgeschichte bei der Methodenentwicklung wiederholen können. Mit PICO werden wir nicht nur die Auflösung auf rund 50 Pikometer verbessern, sondern zugleich auch die Genauigkeit steigern können, mit der sich die Position der atomaren Säulen in Materialien bestimmen lässt. Der Vorteil des verbesserten Auflösungsvermögens wird sich besonders bemerkbar machen, wenn wir verhältnismäßig gering beschleunigte Elektronen einsetzen müssen. Dies ist beispielsweise oft bei weichen oder biologischen Materialien der Fall, die häufig strahlungsempfindlich sind.

Was zeichnet das Ernst Ruska-Centrum neben dem neuen Gerät und der methodischen Kompetenz seiner Wissenschaftler noch aus?

Mayer: PICO ist Bestandteil der weltweit beeindruckendsten Ansammlung von aberrationskorrigierten Elektronenmikroskopen: Sie umfasst auch noch zwei Titan 80–300 der Firma FEI aus dem Jahr 2006 sowie den weltweit ersten Prototypen eines aberrationskorrigierten Elektronenmikroskops. Zu diesen vier Geräten wird noch dieses Jahr ein weiteres Elektronenmikroskop der absoluten Spitzenklasse hinzukommen. Ein Charakteristikum des Ernst Ruska-Centrums ist, dass die Geräte eingesetzt werden, um globale Herausforderungen wie eine klimafreundliche Energieversorgung oder eine energieeffiziente Informationstechnologie anzugehen: Wir forschen beispielsweise an Materialien für CO₂-freie Kraftwerke oder für leistungsfähigere Datenspeicher.

Dunin-Borkowski: Mit seinen Elektronenmikroskopen der weltweit höchsten Leistungsklasse und seinen exzellenten Wissenschaftlern bietet das Ernst Ruska-Centrum ein attraktives Umfeld, das Forscher aus Deutschland, Europa und der Welt anzieht, mit ihren wissenschaftlichen Fragen und Anwendungen hierhin zu kommen.

Das Ernst-Ruska Centrum ist Teil der Jülich Aachen Research Alliance JARA. Warum ist es wichtig, dass es als Gemeinschaftseinrichtung der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich angelegt ist?

Mayer: Eine Forschungseinrichtung alleine – selbst wenn sie so groß ist wie das Forschungszentrum Jülich – kann es nicht rechtfertigen, mehrere aberrationskorrigierte Elektronenmikroskope anzuschaffen, denn ein solches Gerät kostet zwischen 4 und fast 7 Millionen Euro.

Letztlich geht es darum, möglichst viel Nutzen aus den Geräten zu ziehen. Und das kann man nur dann, wenn man Wissenschaftler beschäftigt, die an den Methoden arbeiten, genauso wie Wissenschaftler, die Forschungsprojekte und Anwendungen einbringen. Dann muss man auch noch den wissenschaftlichen Nachwuchs entsprechend ausbilden. Das alles kann eine Forschungseinrichtung alleine kaum leisten. Innerhalb der JARA teilen RWTH Aachen und das

Forschungszentrum Jülich das, was jede Institution am besten kann und bringen so echten Mehrwert hervor.

In welche Richtung wird sich das Ernst Ruska-Centrum weiterentwickeln?

Mayer: Zuallererst muss man sagen: Die erhaltenen Resultate und die Nutzerstatistiken belegen eindrucksvoll, dass das Konzept des ER-C äußerst erfolgreich ist. Wir sind auch im internationalen Vergleich ein führendes Zentrum. Trotzdem gibt es viele Richtungen, in die sich das ER-C weiterentwickeln lässt ...

Dunin-Borkowski: So wollen wir die Elektronenmikroskopie künftig verstärkt einsetzen, um Materialien oder Nano-Bauelemente auf der atomaren Ebene im Betrieb

zu vermessen. Daher bietet das nächste Gerät, das wir bekommen werden, mehr Platz um die Probe herum, so dass wir unter Beobachtung im Elektronenmikroskop Experimente durchführen können. Ein anderer Weg, über den wir nachdenken: Bislang standen im ER-C vor allem Materialien für eine künftige Informationstechnologie im Mittelpunkt. Doch es gibt viele Wissenschaftlergruppen anderer Ausrichtungen, die von der hochauflösenden Elektronenmikroskopie und den hier entwickelten Methoden profitieren können, etwa im Bereich weicher, biologischer oder geologischer Materialien. Gleichzeitig können wir hier von deren Fragestellungen und Anwendungen profitieren. Es wäre also sinnvoll, verstärkt mit solchen Communities zu kooperieren.

Steckbrief Ernst Ruska-Centrum (ER-C)

Mit dem ER-C betreiben Forschungszentrum Jülich und RWTH Aachen unter dem Dach der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) ein Kompetenzzentrum für atomar auflösende Elektronenmikroskopie und -spektroskopie auf international höchstem Niveau. Das ER-C entwickelt wissenschaftlich-technische Infrastruktur und

Methoden für die Materialforschung von heute und morgen. Es ist zugleich ein nationales Nutzerzentrum für höchstauflösende Elektronenmikroskopie. Die Hälfte der verfügbaren Messzeit wird nach wissenschaftlichen Kriterien an externe Nutzer aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie vergeben.

Der Schlüssel zu Innovationen

Unsere Gesellschaft muss Möglichkeiten finden, unseren Energiebedarf künftig klimafreundlich zu stillen. Außerdem benötigen wir energieeffizientere und zugleich leistungsfähigere Methoden, um Informationen und Wissen auszutauschen und zu bewahren. Diese großen Herausforderungen lassen sich nur mit Hilfe technologischer Innovationen meistern. Vier Beispiele zeigen, wie die Wissenschaftler des ER-C die leistungsfähigsten Elektronenmikroskope unserer Zeit einsetzen, um solche Innovationen hervorzubringen.

Beispiel 1:

Längst bestimmen Informations- und Kommunikationstechnologien unseren Alltag und die Produktivität von Industrie- und Dienstleistungsunternehmen. Auch weiterhin sollen nicht nur die Prozessoren ständig kleiner, leistungsfähiger und energieeffizienter werden, sondern außerdem die Datenspeicher. Heutige Computer-Festplatten beruhen auf magnetischen Materialien. Mit speziell ausgerüsteten Höchstleistungselektronenmikroskopen und bestimmten Aufnahme- und Auswertetechniken lassen sich die magnetischen Felder in solchen Materialien sichtbar machen. „Und zwar mit einer Auflösung von wenigen Nanometern, die von keiner

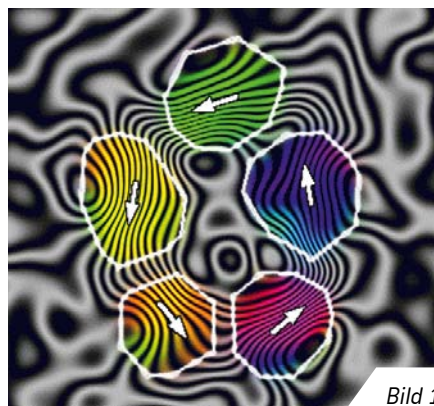


Bild 1

anderen Methode erreicht wird“, sagt Prof. Rafal Dunin-Borkowski, der seit Jahren die sogenannte Elektronenholografie zur Untersuchung magnetischer Materialien vorantreibt und das entspre-

chende Know-how mit an das ER-C gebracht hat. Bild 1 zeigt die Magnetfeldlinien (schwarz) und ihre Richtung (weiße Pfeile) in einer ringförmigen Anordnung von Kobalt-Partikeln (weiße Umrandung), die lediglich 20 bis 30 Nanometer groß sind. Die Partikel beeinflussen sich gegenseitig über die magnetischen Felder, wobei jeder Partikel nur eine einzige magnetische Domäne enthält, erkennbar jeweils an der weitgehend einheitlichen Farbe innerhalb des Partikels. Die selbstorganisierte ringförmige Struktur ist eine Kandidatin für die Datenspeicher der Zukunft, denn sie ist kleiner als viele entsprechende Einheiten heutiger Speicher.

Beispiel 2:

Wissenschaftler des ER-C erforschen Ferroelektrika. Daten, die in diesen Materialien gespeichert werden, bleiben anders als in heutigen Computer-Arbeitsspeichern auch nach dem Ausschalten des Rechners erhalten. Mit einem hochauflösenden Elektronenmikroskop haben Forscher des ER-C erstmals direkt beobachtet, dass sich die elektrischen Dipole in einem ferroelektrischen Material nahezu kontinuierlich drehen lassen (Bild 2). Dies

ermöglicht, dass sich winzige Bereiche – Fachsprache: Domänen – bilden. Vier solcher dreiecksförmiger Domänen können zusammen einen nanometergroßen „Elementarwirbel“ bilden, in dem sich das elektrische Feld um 360 Grad dreht. Auf der Basis dieses Drehsinns, mit oder gegen den Uhrzeigersinn, lässt sich auf kleinstem Raum ein digitales Bit realisieren. Das eröffnet einen Weg zu Arbeitsspeichern, die sich sehr dicht mit nichtflüchtigen Daten beschreiben lassen.

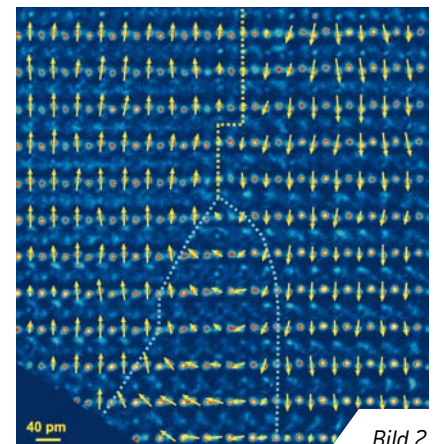
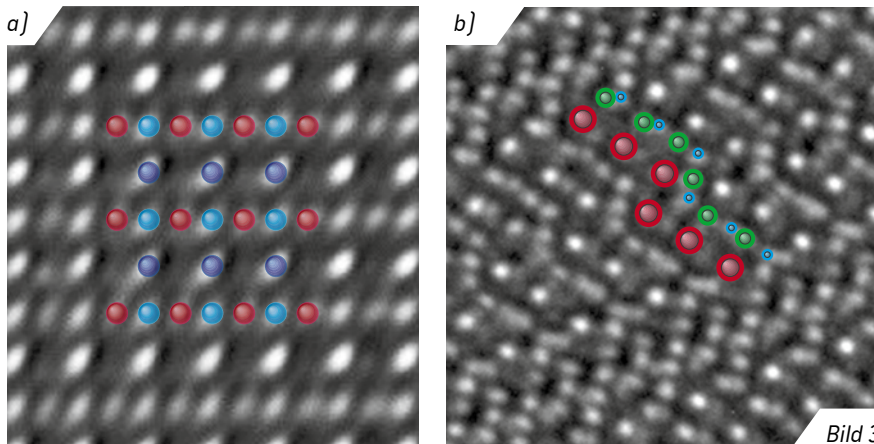


Bild 2

Beispiel 3:



Kohle- und Gaskraftwerke tragen mit ihrem Kohlendioxid-Ausstoß entscheidend zur Klimaerwärmung bei. Die Emissionen könnten verringert werden, indem das CO₂ aus dem Gasstrom der Kraftwerke abgetrennt und beispielsweise unterirdisch gespeichert wird. Wissenschaftler der Jülich Aachen Research Alliance JARA arbeiten zusammen mit Universitäten, Forschungseinrichtungen und industriellen Partnern an Membranen, mit denen sich gezielt Gase wie Kohlendioxid, Wasserstoff

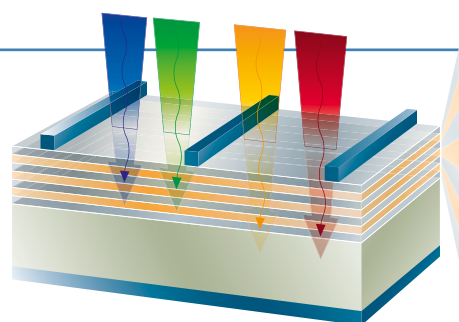
oder Sauerstoff abtrennen lassen. Mit Hilfe dieser Membranen sollen sich künftig Verfahren verwirklichen lassen, die nicht so energieaufwendig sind wie herkömmliche Abtrennungsmethoden.

Auf ihrer Suche nach den effizientesten Membranen stellen die kooperierenden Wissenschaftler auf unterschiedliche Weise zahlreiche Materialien her. Anschließend testen sie, wie gut und wie lange sie unter den Bedingungen funktionieren, die in einem Kraftwerk

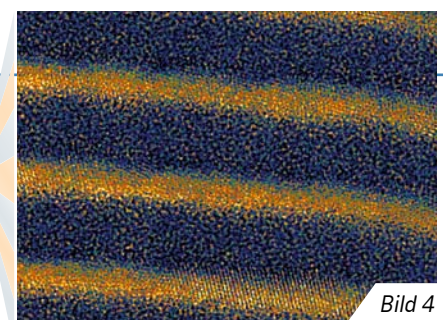
herrschen. Dank der Forscher und den Elektronenmikroskopen des ERC tapen sie nicht im Dunkeln, wenn sie nach den Ursachen für die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Materialien suchen. Denn diese wird letztlich durch die Anordnung der Atome bestimmt, die im Elektronenmikroskop sichtbar wird. So haben die ERC-Forscher Proben eines Materials mit dem Namenskürzel BSCF untersucht, das prinzipiell geeignet erscheint, um Sauerstoff und Stickstoff bei 700 bis 900 °C voneinander zu trennen. Dabei haben sie festgestellt, dass sich bei diesen Temperaturen nach mehreren hundert Stunden Bereiche bilden, in denen die Atome anders als ursprünglich angeordnet sind (Bild 3a und b) – mit negativen Folgen für die Sauerstoffleitfähigkeit des Materials. Dadurch haben die Forscher nun einen Ansatzpunkt, um das potenzielle Membranmaterial weiter zu verbessern: Sie können beispielsweise durch chemische Zusätze verhindern, dass sich die Atome umordnen.

Beispiel 4:

Solarzellen nutzen eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle – die Sonne – und erzeugen sauberen Strom. Forscher des ERC sind als Partner eines Verbundprojektes an der Entwicklung von Solarzellen beteiligt, die das einfallende Sonnenlicht besonders gut ausschöpfen. Mit dem neuen Höchstleistungsmikroskop PICO haben sie Multilagen-Schichtstrukturen untersucht. Diese Schichtstrukturen absorbieren den blauen und grünen Anteil des Lichtes



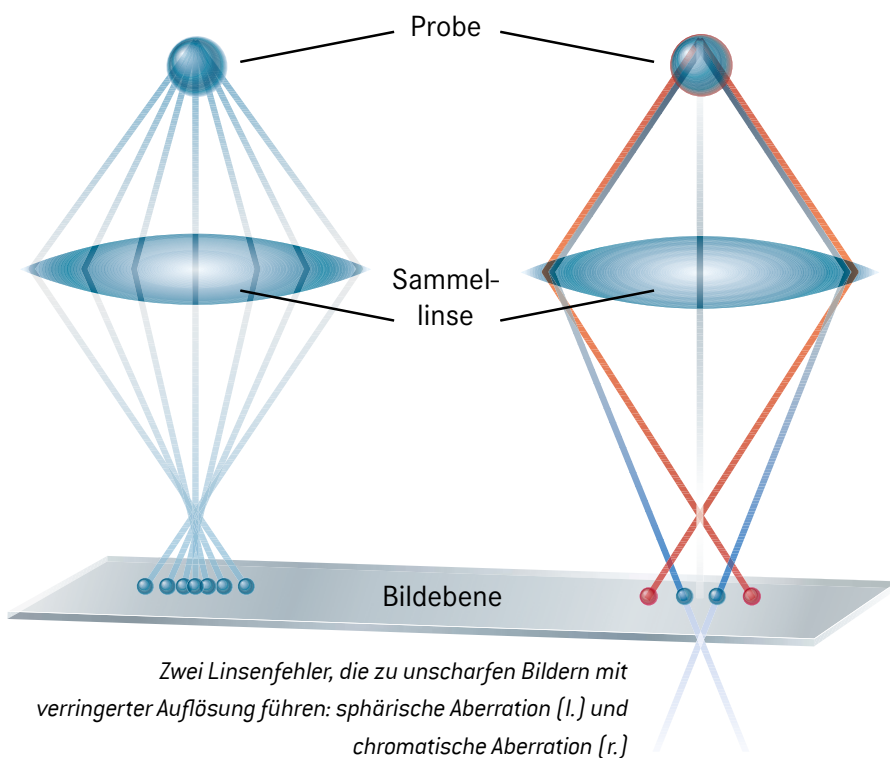
es besser als klassische Solarzellen (Bild 4 links). Bild 4 rechts wurde mit inelastisch gestreuten Elektronen aufgenommen – ein Abbildungsmodus, in dem sich dank PICO atomare Auflösung



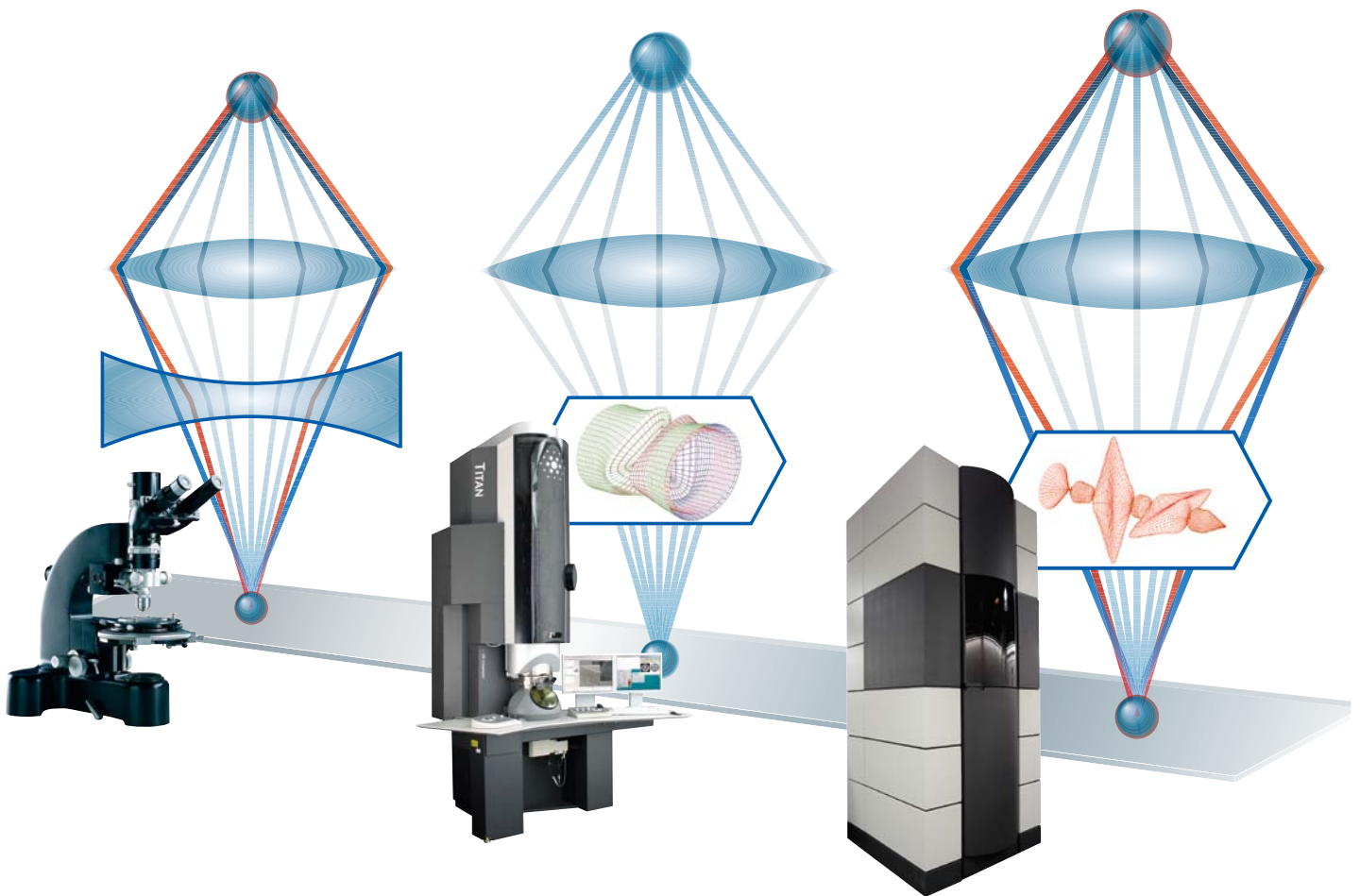
erzielen lässt. Bedeutsam ist auch eine möglichst präzise Vermessung der einzelnen Schichtdicken, denn diese sind für das Absorptionsvermögen der Solarzelle entscheidend.

Das Know-How hinter den höchstauflösenden Elektronenmikroskopen

Während in Lichtmikroskopen ein Strahl elektromagnetischer Wellen – das Licht – die Probe beleuchtet, nutzt man dazu in Elektronenmikroskopen ein Bündel von beschleunigten Elektronen. Der prinzipielle Strahlenverlauf ist in beiden Mikroskopen gleich. Doch die Korrektur von Bildfehlern ist beim Elektronenmikroskop ungleich schwieriger. Darüber hinaus hilft selbst eine perfekt berichtigende Optik alleine nicht weiter, wenn man mit ihr in die Welt der Atome vorstößt. Weil in dieser Dimension die Quantenphysik regiert, reicht eine visuelle Bildinterpretation oft nicht mehr aus. Zur Auswertung benötigt man dann raffinierte Computerprogramme.



Rotationssymmetrische magnetische Felder, die in Elektronenmikroskopen als Linsen dienen, weisen physikalisch unvermeidbare Abbildungsfehler auf, die auch von Glaslinsen in Lichtmikroskopen bekannt sind. Zwei davon sind besonders bedeutsam. Der erste ist der sogenannte Öffnungsfehler, der auch als sphärische Aberration bezeichnet wird: Strahlen, die unter großen Winkeln zur optischen Achse eindringen und die Linsenränder durchlaufen, werden stärker abgelenkt als Strahlen, die weitgehend zentral durch



Beim Lichtmikroskop (l.) sorgt eine Zerstreuungslinse für die Korrektur der Abbildungsfehler. Elektronenmikroskope der letzten Generation (M.) können dank einem Hexapol-Korrektor die sphärische Aberration beheben. PICO (r.) korrigiert mit einem System aus magnetischen und elektrostatischen Multipol-Elementen nun auch die chromatische Aberration.

die Linse einfallen. Das Resultat sind unscharfe Bilder mit einer verringerten Auflösung.

Der zweite Fehler ist die chromatische Aberration: Linsen für Elektronenwellen brechen genau wie herkömmliche Linsen Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge verschieden stark. Weil die Wellenlänge des Lichtes die Farbe festlegt, die von uns wahrgenommen wird, heißt die chromatische Aberration auch Farbfehler. Auch er führt zu unscharfen Bildern. Beide Abbildungsfehler sind in Licht-

mikroskopen schon früh dadurch behoben worden, dass zusätzliche Zerstreuungslinsen eingebaut wurden. Die Zerstreuung des Elektronenstrahls gelang dagegen erstmals Ende der 1990er Jahre mit einem sogenannten „Hexapol-Korrektor“. Seine Schlüsselemente sind zwei Multipol-Elemente, in denen sechs (griechisch: hexa) Magnetspulen die zentrale Öffnung für den Elektronenstrahl umgeben. Die Wirkung der jeweils sechs, sich überlagernden Magnetfelder entspricht der einer Zerstreuungslinse. Der Korrektor behebt die sphärische

Aberration, die das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops besonders stark begrenzt. Die chromatische Aberration ist noch schwerer zu korrigieren. Dazu benötigt man ein System aus magnetischen und elektrostatischen Multipol-Elementen, das deutlich komplizierter ist als der Hexapol-Korrektor.

Ein Korrektor funktioniert erst dann, wenn Dutzende von magnetischen und elektrostatischen Feldern präzise aufeinander abgestimmt sind. Um diese Justage durchführen zu können, muss

man zunächst den „Ist-Zustand“ des Systems vermessen. Das ist ähnlich wie bei einem Navigationssystem, das zunächst einmal den Ort bestimmen muss, wo es sich befindet, bevor es den kürzesten Weg zum Ziel vorschlagen kann. Doch während ein Navi für die Ortsbestimmung nur zwei exakte Koordinaten für den Längen- und Breitengrad benötigt, müssen für die Diagnose der Linsenfehler rund 30 Parameter bestimmt werden. Wissenschaftler des Ernst Ruska-Centrums haben für diese schwierige Diagnose die Software ATLAS entwickelt. Ein solches Computerprogramm ist auch deshalb notwendig, weil sich der Justagezustand eines aberrationskorrigierten Elektronenmikroskops innerhalb von Minuten verändert, manchmal sogar innerhalb von Sekunden. Dafür gibt es viele Gründe, beispielsweise minimalste Temperaturschwankungen irgendwo in der Mikroskopsäule, Schwankungen der Spannungsquelle oder Lageveränderungen der Probe.

Auch für die später folgende Bildanalyse haben die Wissenschaftler des ER-C Software entwickelt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Lichtmikroskopie ist eine solche computergestützte Analyse in der aberrationskorrigierten Elektronenmikroskopie meistens notwendig. Denn wenn der Elektronenstrahl auf die Atome der Probe trifft, regiert die Quantenphysik. Das hat Konsequenzen: Beispielsweise hängt das Bild einer Anordnung von Atomen von der Dicke des Präparates ab. Dabei ist fast jedes beliebige Aussehen möglich, und im Bild

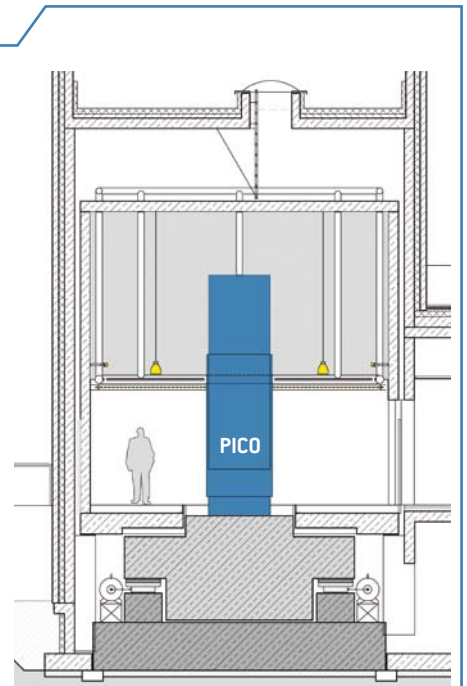
erscheinen „Atome“ an Stellen, an denen in Wirklichkeit gar keine sind oder umgekehrt. Nur unter bestimmten Bedingungen lässt sich dieses Problem auf direkte Weise – ohne Computerunterstützung – umgehen.

Will man mit dem Elektronenstrahl Atome abbilden, so müssen diese einen ausreichenden Kontrast aufweisen. Doch die scharfe Abbildung der atomaren Strukturen lässt sich normalerweise mittels eines Kontrastmechanismus erzielen, der nicht unserer Alltagserfahrung entspricht. Bei diesem Ab-

bildungsverfahren wird der Kontrast umso schlechter, je näher man bei der Einstellung der Objektivlinse dem Fokus kommt. Um folglich überhaupt etwas sehen zu können, muss man gezielt „unscharf“ abbilden und das Ergebnis hängt dann empfindlich vom Fokuswert ab. Die Software Truelmage, die am ER-C entwickelt wurde, ist in der Lage, sich aus einer Serie von Aufnahmen mit unterschiedlichen Fokuswerten gleichsam rückwärts Informationen über die Abbildungsbedingungen zur Zeit der Bilderfassung zu erschließen und damit auch Restaberrationen zu eliminieren.

Schwingungsfrei aufgestellt

Rund fünf Kilometer Luftlinie vom Ernst Ruska-Centrum entfernt fördern die größten Bagger der Welt Braunkohle. Kein Mensch spürt in dieser Entfernung noch die Bewegungen im Erdreich, die von den Kolossen hervorgerufen werden. Und doch würden diese Schwingungen die Arbeit der Höchstleistungsmikroskope beeinträchtigen, wenn diese nicht in einem Gebäude untergebracht wären, das durch aufwendige bauliche Maßnahmen von der Umgebung weitgehend entkoppelt ist. Der Neubau des ER-C erfüllt auch alle Anforderungen, die der Betrieb der Mikroskope an die magnetische Abschirmung oder an das Raumklima stellt.





Prof. Knut Urban vor einem der hochauflösenden Elektronenmikroskope des ER-C.

Pionier der atomaren Elektronenmikroskopie

Interview mit JARA-Seniorprofessor Prof. Knut Urban

Wie kamen Sie dazu, in den letzten zwanzig Jahren einen großen Teil Ihrer wissenschaftlichen Laufbahn der atomaren Elektronenmikroskopie zu widmen?

Als ich Ende der 1980er Jahre ans Forschungszentrum Jülich und die RWTH Aachen berufen wurde, befand sich die Festkörperforschung in Deutschland in einer Phase des Aufschwungs. Man wollte die absehbar gewordenen physikalischen Grenzen der Halbleitertechnologie entscheidend hinausschieben. Dafür musste man die Funktionen von Materialien und Bauelementen auf atomarer Ebene verstehen. Unglücklicherweise konnte dazu die Elektronenmikroskopie nur eingeschränkt

etwas beitragen. Tatsächlich war es trotz jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit nicht gelungen, die Elektronenoptik so zu verbessern, dass man atomares Auflösungsvermögen erreichen konnte. Genau wie viele Kollegen weltweit versuchten wir daher in Jülich im Grenzbereich zur atomaren Welt mikrostrukturelle Forschung zu betreiben. Wir waren damit recht erfolgreich. Insbesondere gelang es uns, mit Hilfe computergestützter Verfahren die Grenzen der Optik weiter hinauszuschieben. Angesichts der noch ungenügend entwickelten Computertechnologie war das alles dennoch recht mühsam. Hinzu kam, dass die Stagnation in der Elektronenoptik die einschlägige Industrie wirtschaftlich an den Rand drängte.

Wie änderte sich diese unbefriedigende Situation?

Harald Rose, Professor für Theoretische Physik in Darmstadt, hatte Ende der 1980er Jahre das Konzept einer Korrekturlinse berechnet, mit dem es gelingen sollte, die Physik der magnetischen Felder gewissermaßen zu überlisten und somit endlich aberrationskorrigierte Elektronenlinsen zu bauen. Ich lernte ihn und Maximilian Haider, Leiter der Abteilung Elektronenmikroskopie am EMBL in Heidelberg, auf der Tagung der Deutschen Gesellschaft für Elektronenmikroskopie 1989 in Salzburg kennen. Die beiden suchten für ihr Projekt zur Realisierung des Rose-Korrektors einen Partner mit entsprechender Reputation in der modernen Materialforschung. Für mich tauchte damit das Tor zur atomaren Welt am Horizont auf. Es gelang uns dann, die Volkswagenstiftung von dem Projekt zu überzeugen. Es wurde anschließend von Maximilian Haider und seinen Leuten ab 1991 in Heidelberg realisiert. Die ersten, zumindest im Prinzip atomaren Bilder mit dem ersten optisch korrigierten Elektronenmikroskop der Welt erhielten wir dann 1997 noch in Heidelberg. Wir reichten unsere Arbeit bei Nature ein. Unsere Enttäuschung war groß, als sie abgelehnt wurde. Wie oft in der Geschichte der Naturwissenschaften wurde das wirklich Neue nicht unmittelbar erkannt. Im folgenden Jahr wurde das Paper dann von Nature doch veröffentlicht und erregte viel Aufsehen.

Also war der Traum von der Materialforschung in atomaren Dimensionen in Erfüllung gegangen?

Zwar war das Tor zur atomaren Welt offen. Doch was wir da sahen, war nicht ohne weiteres verständlich. Denn die atomare Welt ist die Welt der Quantenphysik. Nun zahlte es sich aus, dass wir in Jülich seit langem eines der international führenden Institute auf dem Gebiet der computergestützten quantenphysikalischen elektronenoptischen Bildberechnung und Bildinterpretation waren. Unkonventionell ausgedrückt geht es in der atomaren Elektronenmikroskopie um eine Interpretation der „Bilder“ mit einem Gehirn, das die Quantenphysik versteht. Dieses Gehirn ist der Computer, der mit den quantenphysikalischen Gesetzen gefüttert wurde. Aufgrund der Jülicher quantenmechanisch-optischen Bildinterpretation und mit der neuesten Gerätetechnik können wir heute atomare Bewegungen im Bereich von einem Pikometer messen. Dies entspricht etwa einem Hundertstel des Durchmessers des Wasserstoffatoms.

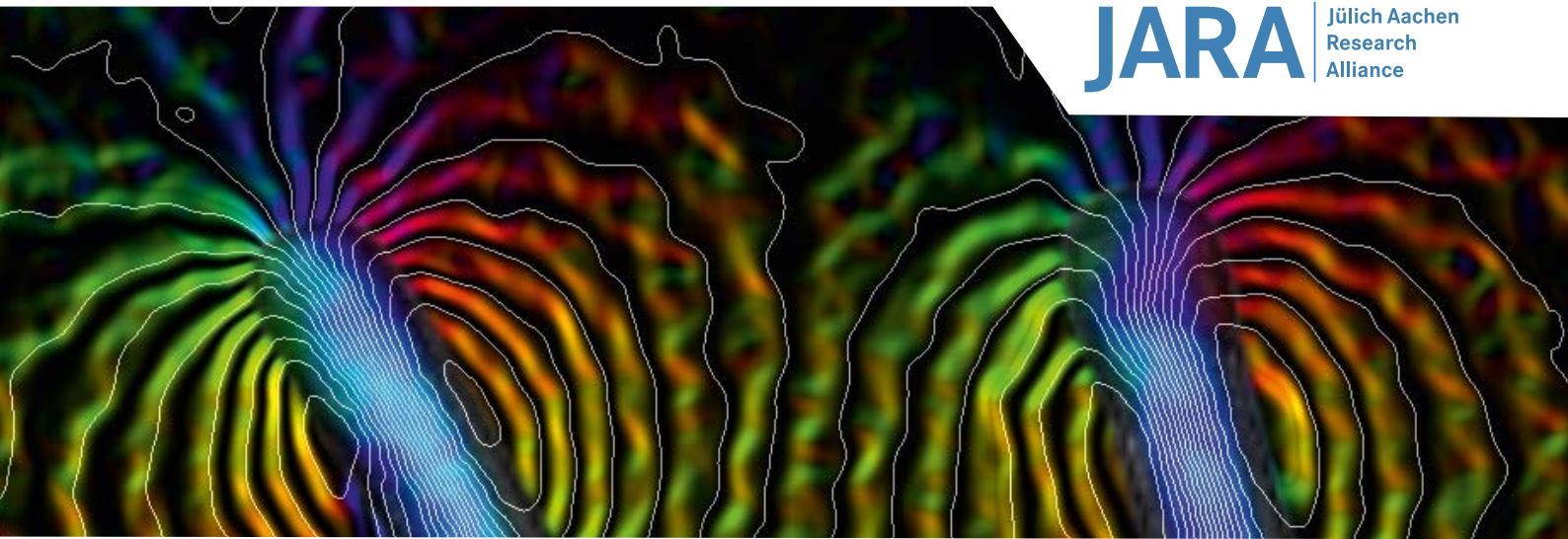
Sind solche kleinen Dimensionen für unsere makroskopische Welt überhaupt noch von Bedeutung?

So klein diese Dimensionen sind, so sind sie doch für viele strukturbedingten Eigenschaften entscheidend. Nehmen Sie als Beispiel einen ferroelektrischen Speicher, wie Sie ihn in Chipkarten oder

auch in manchen elektronischen Autoschlüsseln finden. Die digitalen Bits sind dort in Form von Verschiebungen von Sauerstoffatomen gegenüber ihren Nachbaratomen in der Größenordnung von zehn Pikometern eingeschrieben. Auch die chemische Wirkung vieler Katalysatoren für chemische Reaktionen geht einher mit solch winzigen atomaren Verschiebungen nahe der Katalysatoroberfläche.

Sie sind als Direktor des ER-C 2011 in den Ruhestand gegangen. Werden Sie dem ER-C weiterhin Ihre Erfahrung und Ihr Wissen zur Verfügung stellen?

Das ER-C und die beiden Betreiber-Institute, das PGI-5 in Jülich und das GFE der RWTH, sind mit hervorragenden Wissenschaftlern und einer einmaligen Geräteausrüstung sowie einem hochaktuellen Forschungsprogramm international exzellent aufgestellt. Ich habe mich vertraglich an die Jülich Aachen Research Alliance, JARA, gebunden und muss dafür Leistungen erbringen. Zudem wurde ich kürzlich zum ersten JARA-Seniorprofessor ernannt. Vor diesem Hintergrund möchte ich hier wie jeder normale Mitarbeiter des ER-C weiter meine wissenschaftliche Arbeit machen, solange es geht. Außerdem habe ich Professuren an zwei Universitäten in China und werde dort versuchen, besonders qualifizierte wissenschaftliche Nachwuchskräfte für das ER-C anzuwerben.



Wissenschaft und Industrie profitieren

Das Ernst Ruska-Centrum wurde 2004 als erstes nationales Nutzerzentrum für höchstauflösende Elektronenmikroskopie gegründet, das für Wissenschaftler aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie offen steht. Darüber hinaus kooperiert das ER-C mit der Firma FEI, einem der innovativsten Unternehmen in der Elektronenmikroskopie-Branche.

Die Höchstleistungselektronenmikroskope am ER-C stehen zur Hälfte der Nutzungszeit Forschern zur Verfügung, die nicht der RWTH Aachen oder dem Forschungszentrum Jülich angehören. Dies entspricht einer Absprache mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und stellt eine universitätsnahe und anwendungsorientierte Ausrichtung des ER-C sicher. Die Nutzung der Elektronenmikroskope muss beim ER-C beantragt werden. Ein Gutachtergremium, das von der DFG benannt ist, prüft diese Anträge dann nach wissenschaftlichen Kriterien.

Im Nutzerbetrieb bietet das ER-C neben elektronenoptischen Spitzengeräten auch Einrichtungen zur Probenpräparation und zur Voruntersuchung elektronenmikroskopischer Präparate. Außerdem

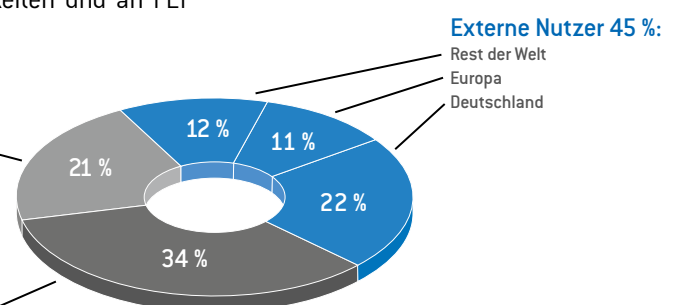
unterstützen die Wissenschaftler des ER-C die Nutzer aus Wissenschaft und Industrie mit ihrem methodischen Know-how etwa bei der Analyse von Messdaten.

Die Wissenschaftler des ER-C bringen ihre methodische Kompetenz außerdem in die Kooperation mit dem Elektronenmikroskop-Hersteller FEI ein. So helfen sie, die selbst entwickelten und an FEI

lizenzierten Software-Pakete Truemage und ATLAS in die Programmroutinen der High-End-Geräte des Unternehmens zu integrieren. Truemage wird zur Bildanalyse bereits weltweit angewendet. ATLAS dient der Diagnose des momentanen elektronenoptischen Gerätezustands (s. S. 12). Die Experten des ER-C arbeiten weiter ständig daran, Software und Methoden zu perfektionieren.

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM



Nutzung der Höchstleistungselektronenmikroskope am ER-C zwischen 2009 und 2011

Lohnende Zusammenarbeit

Interview mit Markus Wild, Geschäftsführer FEI Deutschland GmbH.

Das neue Elektronenmikroskop mit chromatischer Aberrationskorrektur und zwei andere höchstauflösende Geräte im ER-C wurden bei Ihrem Unternehmen gekauft. Ist das ER-C für Sie ein normaler Kunde?

Nein. Zum einen hat das ER-C weltweit einen extrem guten wissenschaftlichen Ruf. Für uns ist dabei vor allem die hohe Reputation in der Methoden- und Technologieentwicklung wichtig. Zum anderen arbeiten wir schon viele Jahre zusammen. Denn die Wissenschaftler des ER-C gehen immer an die Grenzen des technisch Machbaren. Und für einen Gerätehersteller wie FEI lohnt sich die Zusammenarbeit allein schon deshalb, um die nächsten Herausforderungen und Entwicklungsschritte besser absehlen zu können.

Haben die Wissenschaftler des ER-C Anteil daran, dass FEI überhaupt höchstauflösende Elektronenmikroskope anbieten kann?

Auf jeden Fall. Das wird schon daran sichtbar, dass das weltweit erste verfügbare Elektronenmikroskop mit sphärischer Aberrationskorrektur in Jülich aufgebaut wurde. Mittlerweile sind entsprechende Geräte Standard. Außerdem haben die Wissenschaftler des ER-C Software entwickelt, die wir kommerzialisieren. Diese Software ist wichtig, um die Möglichkeiten der Mikroskope auserschöpfen zu können.

Was erwarten Sie sich künftig von der Zusammenarbeit mit der ER-C?

FEI hat sich immer als Technologieführer in der Elektronenmikroskopie verstanden. Mit Hilfe des ER-C wollen wir diese Rolle auch künftig ausfüllen. Auch in Zeiten, in denen die Wettbewerber auf den Zug der Aberrationskorrektur aufgesprungen sind, wollen wir an der Spitze bleiben.



Markus Wild

Wie bedeutsam ist es für Ihr Unternehmen, dass das ER-C auch Wissenschaftlern außerhalb des Forschungszentrums Jülich und der RWTH Aachen ermöglicht, höchstauflösende Elektronenmikroskope zu benutzen?

Wir sehen natürlich einen gewissen Werbeeffekt. Vor allem aber freuen wir uns, dass die höchstauflösende Elektronenmikroskopie auf diese Weise in der Wissenschaft und in der industriellen Forschung an Stellenwert gewinnt.

Die Mitarbeiter des ER-C



Juri Barthel



Maryam
Beigmohamadi



Chris Boothroyd



Hongchu Du



Martial Duchamp



Rafal
Dunin-Borkowski



Michael Feuerbacher



Marc Heggen



Lothar Houben



Chunlin Jia



Lei Jin



Andr as Kov acs



Markus Lentzen



Martina Luysberg



Joachim Mayer



Doris Meertens



Werner Pieper



Ingrid
Rische-Radloff



Stefan Roitsch



Daniel Stroppa



Wilma Sybertz



Andreas Thust



Karsten Tillmann



Knut Urban



Gabriele
Wa enhoven

Herausgeber: J lich Aachen Research Alliance
Redaktion: Christian Schipke, Dr. Frank Frick
Text: Dr. Frank Frick
Gestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum J lich GmbH
Druck: Print Production M. Wolff GmbH, Aachen
Bilder: JARA [Titel, S.1, S. 2/3, S. 4–7, S. 10/11, S. 13], ER-C [S. 8 u., S. 15 o., S. 17],
Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim [S. 8 o.], S. Roitsch und J. Barthel
[S. 9 o.], M. Beigmohamadi und J. Jinschek [S. 9 u.], Markus Wild [S. 16],
pbr Planungsb uro Rohling AG [S. 12], CEOS [Bildelement S. 11]
Auflage: 1000

Ernst Ruska-Centrum
für Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
Tel.: 02461-614274
E-Mail: er-c@fz-juelich.de
www.er-c.org

AN INITIATIVE OF