



Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

mit dem vorliegenden Jahresbericht 2013 des Instituts für Experimentelle Physik verbinde ich einen ganz herzlichen Dank an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die in diesem Jahr geleistete Arbeit. Dabei freue ich mich ausgesprochen über die in den Bereichen Lehre und Forschung mit messbarem Erfolg erzielten Ergebnisse.

Besonders dankbar bin ich, dass wir im Jahr 2013 zwei ausgezeichnete Wissenschaftler als neue Professoren an unser Institut binden konnten. Die Kollegen Prof. Hermann Ehrlich und Prof. Serguei Molodtsov heiße ich, gemeinsam mit ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, noch einmal sehr herzlich willkommen.

In ausgezeichneter Weise wurde unser Institut durch drei internationale Fachtagungen sichtbar. Mein Dank für die vielfältige fachliche Arbeit und das außerordentliche Engagement im Bereich der Organisation gilt allen Angehörigen des Instituts sowie den zahlreichen Gästen aus dem In- und Ausland. In diesem Zusammenhang war auch der Nobelpreisträger Prof. Dan Shechtman unserer Einladung gefolgt.

Für die umfassende fachliche Ausarbeitung neuer Themenfelder und die damit verbundene Positionierung haben uns die Ergebnisse gemeinsamer Anstrengungen für die Akquise der erforderlichen Drittmittel ausgezeichnete Möglichkeiten gegeben.

Unsere Leistungen in den Bereichen Lehre und Forschung stehen mit den Erwartungen der Drittmitgeber sicher in Einklang. Hier denke ich insbesondere an die Vielzahl von Abschlüssen in unterschiedlichen Stufen der wissenschaftlichen Qualifikation, die rege Publikationsaktivität sowie die zahlreichen Patentanmeldungen. Auf die Graduierenden und Graduierten, ihre Betreuerinnen und Betreuer sowie die Autorinnen und Autoren wissenschaftlicher Kommunikationen bin ich sehr stolz.

Der erreichte Stand soll im vorliegenden Bericht überschaubar werden und potenziellen Partnern Kooperationsmöglichkeiten aufzeigen. Das Institut unterhält bisher gefestigte strategische Partnerschaften mit dem Fraunhofer THM, dem Fraunhofer IWS, dem Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg, der GMBU Rossendorf sowie dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, die viele Vorhaben maßgeblich unterstützen.

Ich freue mich auf ein ertragreiches Jahr 2014.

Mit herzlichem Glückauf!

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Dirk C. Meyer".

Institutsdirektor

Inhalt

Das Institut für Experimentelle Physik	3
Arbeitsgruppen	10
Arbeitsgruppe Prof. Dirk C. Meyer „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“	11
Arbeitsgruppe Prof. Hermann Ehrlich „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“	18
Arbeitsgruppe Prof. Serguei Molodtsov „Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“	24
Arbeitsgruppe Prof. Hans-Joachim Möller „Photovoltaik“	26
Gast-Professor Ingo A. Schwirtlich „Photovoltaik: Modultechnik und Modulmaterialien“	28
Methodisches Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien	30
Methodisches Kompetenzzentrum NCrystED	35
Projekte	36
BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept	37
BMU-Verbundprojekt BaSta – Batterie Stationär in Sachsen	38
ESF-Nachwuchsforschergruppe PyroConvert	39
Krüger-Forschungskolleg: Freiberger Biohydrometallurgisches Zentrum (BHMZ)	40
Veranstaltungen	42
21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie	43
1. Internationale Freiberger Tagung zu Energiespeichermaterialien (ESTORM)	46
12. „International Symposium on Biominerization“ (BIOMIN2013)	48
Einweihung der Bronzeplatte auf dem Schloßplatz	49
Erweiterung des Lehr- und Forschungsangebots durch Anbindung an DESY und European XFEL	50
Publikationen und Lehre	52
Publikationen	53
Konferenzbeiträge	56
Angebotene Lehrmodule	59
Graduierungen und studentische Arbeiten	60
Physikalisches Grundpraktikum	62
Impressum	64

Das Institut für Experimentelle Physik

Das Institut für Experimentelle Physik arbeitet an der Schnittstelle von Kristallographie und Festkörperphysik zur Entwicklung neuer und innovativer Funktionsmaterialien vorwiegend im Bereich der Energie- und Datenspeicher sowie der Biomaterialien. Mehrere interdisziplinäre Arbeitsgruppen befassen sich für diese Materialien mit der Synthese und der Aufklärung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen. Dazu beteiligt sich das Institut für Experimentelle Physik aktiv an Ausbau und Unterhalt des Zentralen Reinraumlabors der TU Bergakademie Freiberg und betreibt die Strukturaufklärung mittels Röntgenstrahlung mit besonderem methodischen Anspruch. Darüber hinaus ist das Institut in ein aktives Kooperationsumfeld eingebunden und hat enge Verbindungen zu internationalen Großforschungseinrichtungen (in Deutschland sind dies XFEL, DESY und BESSY).

In der Geschichte der Bergakademie Freiberg spielte die Physik als solche zunächst eine untergeordnete Rolle. In den ersten Jahrzehnten wurde die physikalische Ausbildung von Mathematikern, Chemikern und Kristallographen mit abgedeckt. Erst im Jahre 1826 wurde eine von der Mathematik getrennte ordentliche Professur für Physik eingerichtet, auf die Ferdinand Reich berufen wurde. Berühmt wurde er durch seine Fallversuche im Drei-Brüder-Schacht bei Brand-Erbisdorf und, zusammen mit Hieronymus Theodor Richter,



durch die Entdeckung des Elements Indium. Außerdem sorgte er durch Beschaffung einer Kopie des Urmeters aus Paris für die Einführung des metrischen Systems in Sachsen.

Heimstätte der Physik in Freiberg war zunächst das Gebäude in der Silbermannstraße. Im Jahre 1956 wurde ein zweites Physikalisches Institut eingerichtet, das mit den Vorlesungen zur Experimentalphysik und den „modernen“ Fachrichtungen wie Atom-, Kern- und Festkörperphysik betraut wurde. Es setzte damit die Tradition des im Jahr 1948 aufgelösten Radiuminstituts fort. Zusammen mit dem 1940 geschaffenen Institut für Geophysik und dem 1951 gegründeten Institut für Theoretische Physik gab es seitdem vier physikalische Institute an der Bergakademie. Im Jahr 2005 bezogen schließlich die drei in der Fakultät für Chemie und Physik angesiedelten Institute für Angewandte, Experimentelle und Theoretische Physik gemeinsam den sanierten Gellertbau in der Leipziger Straße 23 (siehe Bild).



Institut für Experimentelle Physik

Anschrift
Institut für Experimentelle Physik
TU Bergakademie Freiberg
Leipziger Straße 23
09596 Freiberg

Institutdirektor
Prof. Dr. Dirk C. Meyer
Tel.: 03731 39 2860
dirk-carl.meyer@physik.tu-freiberg.de

Geschäftsführung
Dr. Claudia Funke
Tel.: 03731 39 2084
claudia.funke@physik.tu-freiberg.de

Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

Prof. Dr. Dirk C. Meyer
Tel.: 03731 39 2860
dirk-carl.meyer@physik.tu-freiberg.de

Photovoltaik

Prof. i. R. Dr. Hans-Joachim Möller
Tel.: 03731 39 2896
moeller@physik.tu-freiberg.de

Kompetenzzentren

Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien
Dr. Barbara Abendroth
Tel.: 03731 39 2773
barbara.abendroth@physik.tu-freiberg.de

Infrastruktur

Chemielabore
Uta Fischer
Tel.: 03731 39 3228
uta.fischer@physik.tu-freiberg.de

Elektronische Werkstatt
Patrick Zill
Tel.: 03731 39 2646
patrick.zill@physik.tu-freiberg.de

Gerätepools

Mikroskopie-Pool
Dr. Claudia Funke
Tel.: 03731 39 2084
claudia.funke@physik.tu-freiberg.de

Ofen-Pool
Dr. Hartmut Stöcker
Tel.: 03731 39 2773
hartmut.stoecker@physik.tu-freiberg.de

Biominerologie und Extreme Biomimetik

Prof. Dr. rer. nat. habil. Hermann Ehrlich
Tel.: 03731 39 2867
hermann.ehrlich@physik.tu-freiberg.de

Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

Prof. Dr. Serguei Molodtsov
Tel.: 03731 39 2892
serguei.molodtsov@physik.tu-freiberg.de

Lehre

Physikalisches Praktikum
Dr. Hartmut Bergelt
Tel.: 03731 39 2861
hartmut.bergelt@physik.tu-freiberg.de

Vorlesungstechnik
Dipl.-Ing. Dirk Prsa
Tel.: 03731 39 2195
dirk.prsa@physik.tu-freiberg.de

Sekretariat
Stefanie Schlesinger
Tel.: 03731 39 2892
Fax: 03731 39 4314
stefanie.schlesinger@physik.tu-freiberg.de

Kompetenzzentrum NCrystED
Dr. Tilmann Leisegang
Tel.: 03731 419 616 9
tilmann.leisegang@physik.tu-freiberg.de

Mechanische Werkstatt
Christoph Immer
Tel.: 03731 39 2246
christoph.immer@physik.tu-freiberg.de

Spektroskopie-Pool
Dr. Günter Gäßner
Tel.: 03731 39 4087
gaessner@physik.tu-freiberg.de

Die Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik



von links oben nach rechts unten:

Dr. Vasili Bazhenov, Prof. Dr. Hermann Ehrlich, Marco Herrmann, Iaroslav Petrenko, Anja Lehmann, Anton Nikolaev, Toni Köppe, Izabela Zglobicka, Alexey Rusakov, Thomas Köhler, André Ehrlich, Valentin Garbe, Emil Dieterich, Dr. Hartmut Stöcker, Ralph Strohmeyer, Rocco Liebschner, Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Sabine Kaiser, Tina Weigel, Dr. Barbara Abendroth, Sabine Reißnweber, Dr. Tilmann Leisegang, Diana Karsch, Bianca Störr, Doreen Eger, Maximilian Sonntag, Falk Meutzner, Matthias Zschornak, Dr. Günter Gärtner, Alena Raatz, Stefanie Schlesinger, Dr. Wolfram Münchgesang, Tina Nestler, Thomas Behm, Christoph Irmer, Dirk Prsa, Dr. Juliane Walter, Sven Jachalke, Mandy Koitzsch, Uta Fischer, Dr. Claudia Funke, Romy Rietzschel, Juliane Hanzig, Melanie Nentwich, Solveig Rentrop, Dr. Teresa Orellana Pérez.

Geräte am Institut für Experimentelle Physik

Beschichtungsanlagen

- Edwards Auto 306, thermischer Verdampfer
- Savannah S100, Atomic Layer Deposition
- Savannah S200, Atomic Layer Deposition
- Sennotech, Ätzcluster

Elektrische Messplätze

- CAIC, Current Analysis by Inductive Coils
- Gamry Reference 600, Potentiostat
- Hall-Messplatz
- Keithley 4200, Vierspitzenmessplatz
- LBIC, Laser Beam Induced Current
- Oriel Sol1A, Sonnensimulator
- Polarisierungsaufbau im elektrischen Feld
- Pyroelektrischer Messplatz mit HV-Kammer
- Pyroelektrischer Messplatz mit UHV-Kammer
- Sinton WCT 120, Lebensdauermessung
- SPV, Surface Photo Voltage

Mechanische Probenbehandlung

- Struers Accutom-5, Präparationssäge
- Struers RotoPol-35, Poliermaschine
- Struers Secotom-10, Präparationssäge
- Zwicki 2.5, Zugmaschine

Mikroskope

- FEI Helios NanoLab 600i, Rasterelektronenmikroskop mit Focussed Ion Beam
- Jeol JSM 6400, Rasterelektronenmikroskop
- Keyence, Fluoreszenzmikroskop
- Leitz Ergolux AMC, Lichtmikroskop
- SIRM, Scanning Infrared Microscopy
- Zeiss Axiotech, Lichtmikroskop
- Zeiss Jenapol, Polarisationsmikroskop

Röntgendiffraktometer

- Bruker D8 Advance, Dünnschichtdiffraktometer
- Bruker D8 Advance, Pulverdiffraktometer
- Bruker D8 Discover, Hochauflösungsdiffraktometer mit Hochtemperaturkammer
- Bruker D8 Quest, Einkristalldiffraktometer
- Philips X'Pert PW1830, Dünnschichtdiffraktometer
- Seifert 3003TT, Pulverdiffraktometer
- Seifert HZG4, Dünnschichtdiffraktometer
- Seifert HZG4, Universaldiffraktometer

Spektroskopie

- Bruker IFS 113v, FTIR-Spektrometer
- Bruker S8 Tiger, wellenlängendiffusives Röntgenfluoreszenzspektrometer
- Bruker Tensor 27, FTIR-Spektrometer
- Bruker Tensor 37, FTIR-Spektrometer
- Hiden HPR20, Massenspektrometer
- J. A. Woollam M2000 DI, Ellipsometer
- optischer Spektroskopie-Messplatz
- Thermo Fisher Escalab 250Xi, Röntgenphotoelektronenspektrometer

Temperaturbehandlung

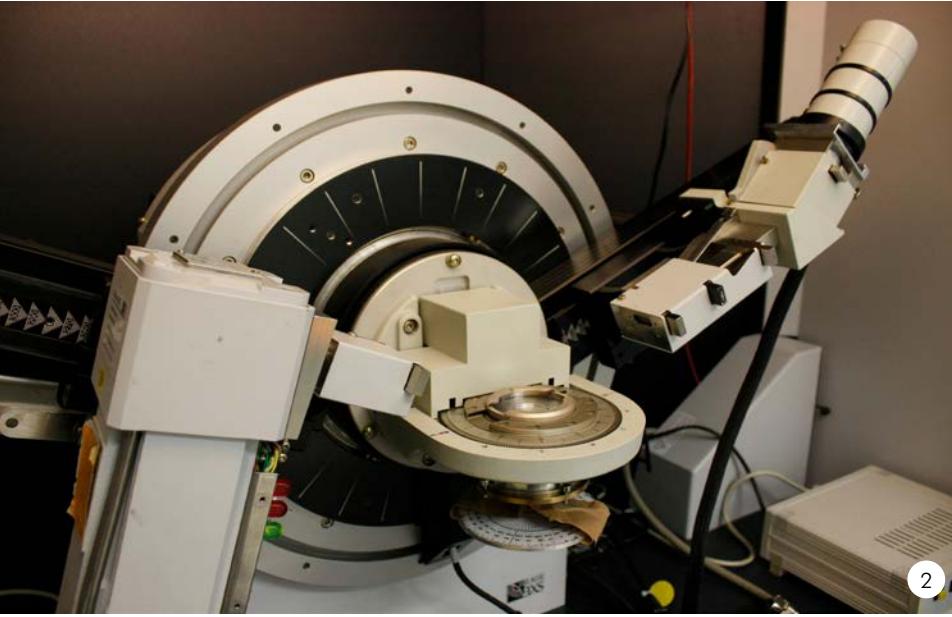
- Carbolite, Rohrofen bis 1200 °C
- Gero, Zehnzenofen bis 1200 °C
- Heraeus, Rohrofen bis 1100 °C
- Leco FRH-80/200/1300, Rohrofen bis 1300 °C
- Xerion RO, Rohrofen bis 1100 °C
- Xerion Xtube, Dreizonenofen bis 1200 °C

Topographie

- DI Dimension 3000, Rasterkraftmikroskop
- Olympus Lext, Konfokalmikroskop
- Polariskopie, Spannungstopographie
- Tencor, mechanisches Profilometer
- UBM Microfocus Expert, Lasertopograph
- Veeco Multimode V, Rasterkraftmikroskop

Bilder auf den nächsten Seiten:

- 1 Struers RotoPol-35, Poliermaschine
- 2 Bruker D8 Advance, Pulverdiffraktometer
- 3 Veeco Multimode V, Rasterkraftmikroskop
- 4 Struers Accutom-5 und Secotom-10, Präparationssägen
- 5 Gero, Zehnzenofen bis 1200 °C
- 6 Bruker S8 Tiger, Röntgenfluoreszenzspektrometer
- 7 Bruker D8 Discover, Hochauflösungsdiffraktometer
- 8 Thermo Fisher Escalab 250Xi, Photoelektronenspektrometer
- 9 Zeiss Axiotech, Lichtmikroskop
- 10 Hall-Messplatz
- 11 Veeco Multimode V, Rasterkraftmikroskop
- 12 Bruker S8 Tiger, Röntgenfluoreszenzspektrometer
- 13 Bruker S8 Tiger, Röntgenfluoreszenzspektrometer
- 14 FEI Helios NanoLab 600i, Rasterelektronenmikroskop mit FIB
- 15 Bruker Tensor 27, FTIR-Spektrometer

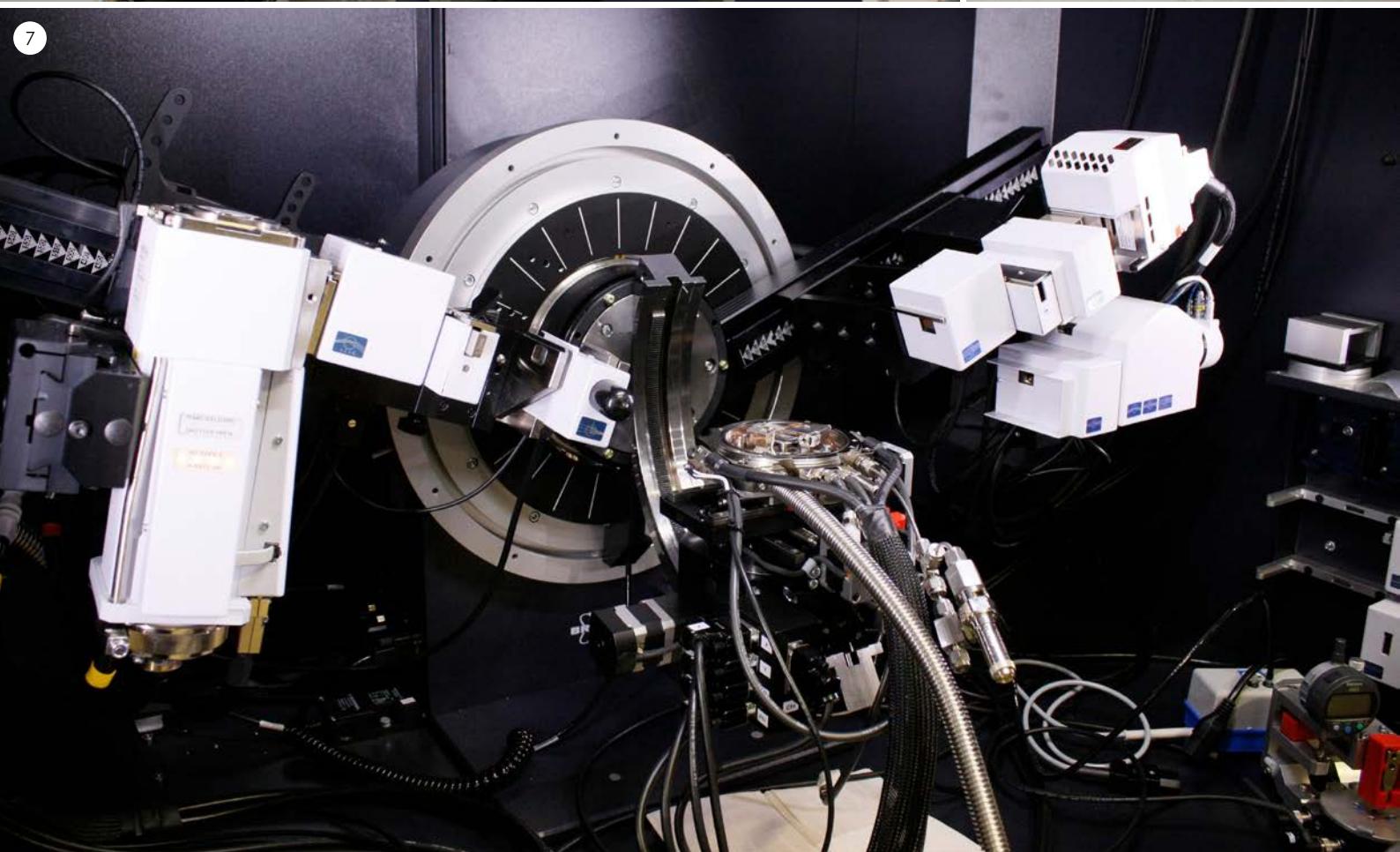




5



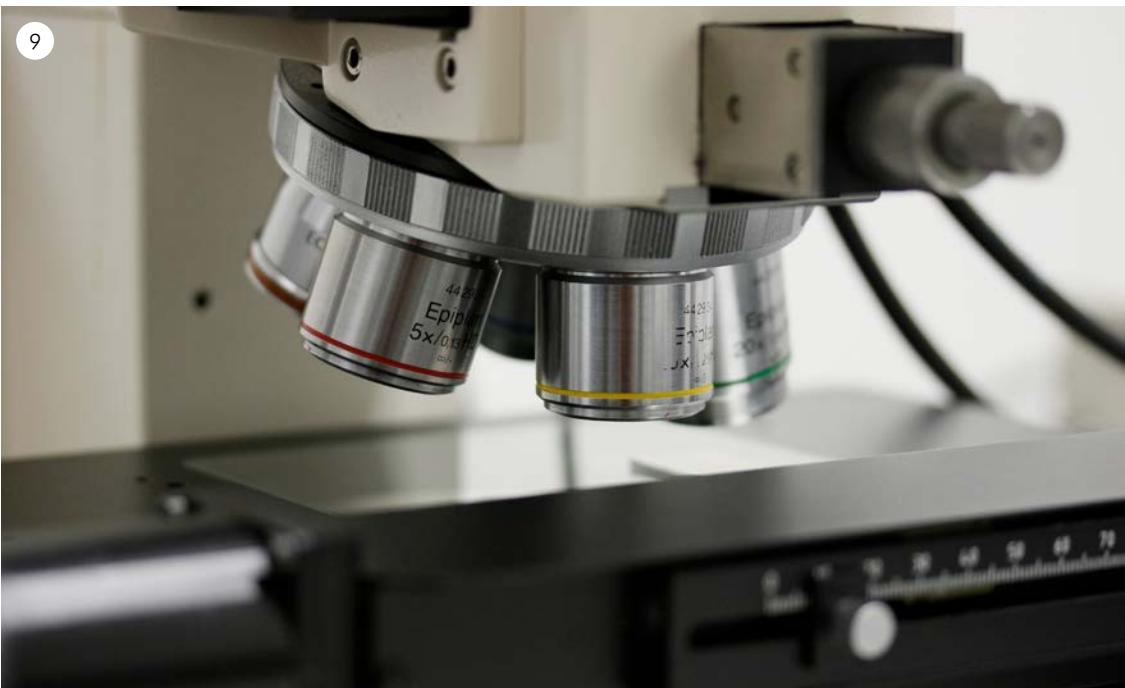
6



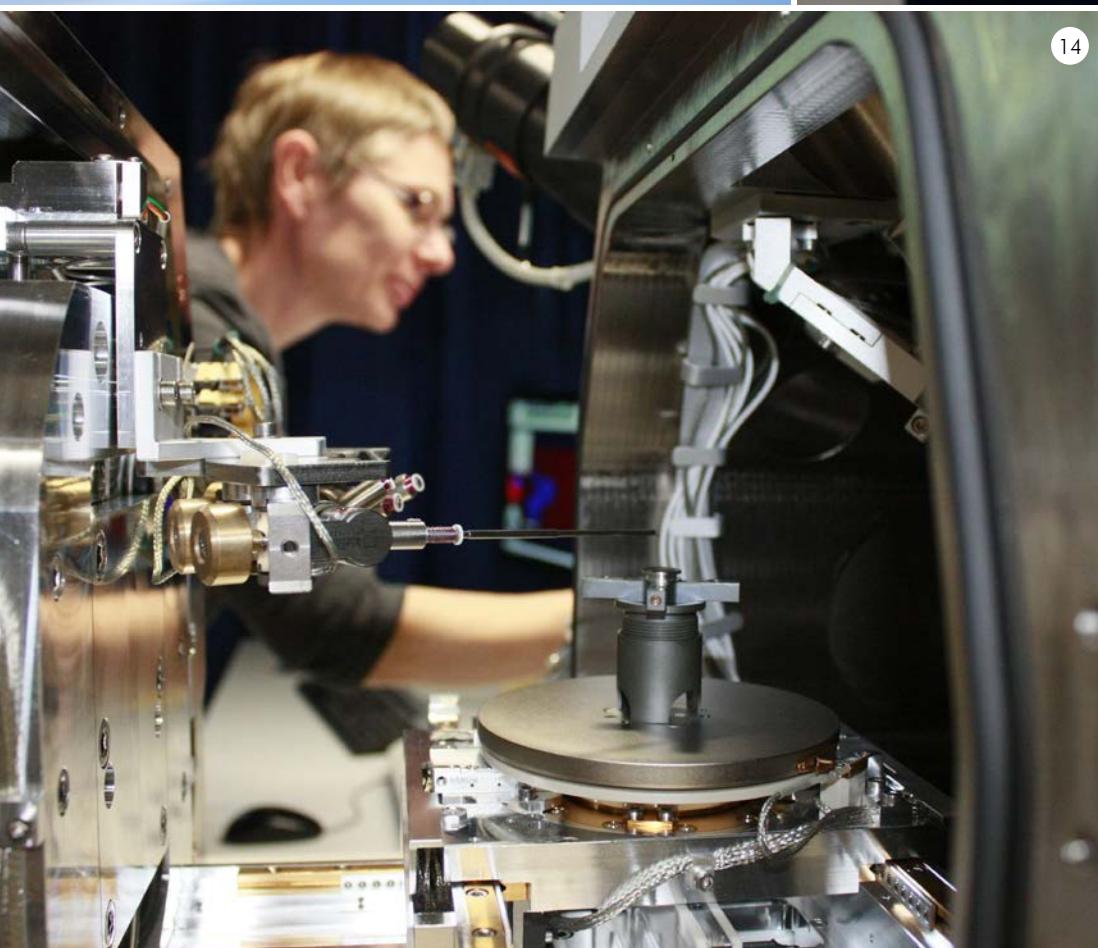
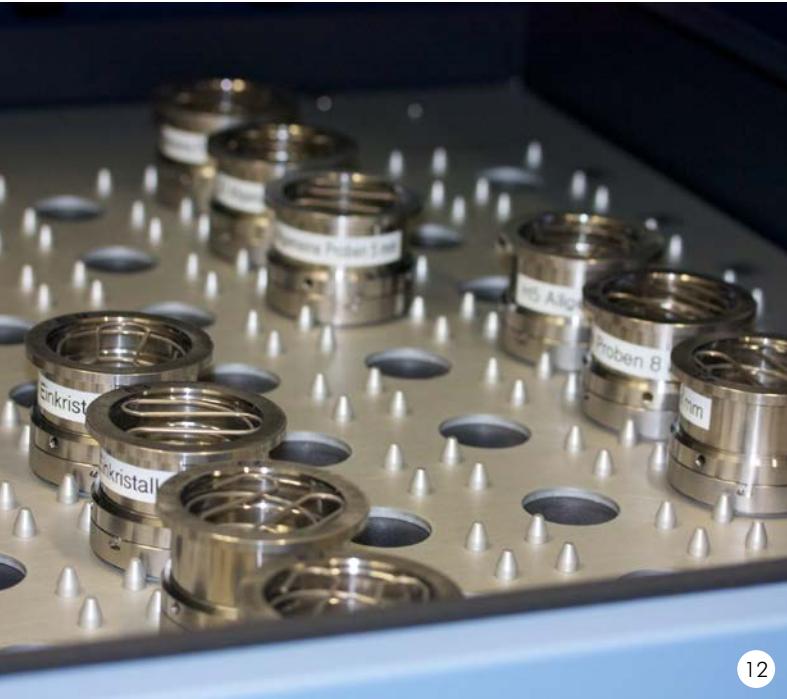
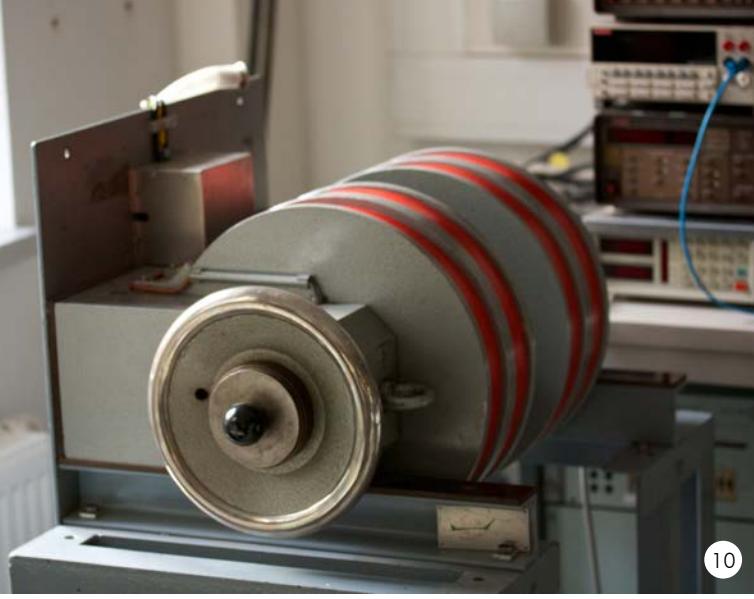
7



8



9



Arbeitsgruppen

Arbeitsgruppe Prof. Dirk C. Meyer

„Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“

Die Zielsetzung der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ folgt einem der wesentlichen Forschungsschwerpunkte der TU Bergakademie Freiberg und wurde hinsichtlich der zugeordneten Professur mit entsprechender thematischer Grundverankerung im Jahr 2009 durch Prof. Dirk C. Meyer neu besetzt. Für die Arbeit mit dem Schwerpunkt „Halbleitermaterialien“ steht als besondere Einheit seit dem Jahr 2008 das Zentrale Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg, das verschiedenen Arbeitsgruppen aus den Bereichen Physik, Elektronik- und Sensormaterialien, Chemie und Werkstoffwissenschaft eine hervorragende Infrastruktur bietet, zur Verfügung. Der seit der Übernahme der Professur vorangetriebene Ausbau der Infrastruktur des Instituts für Experimentelle Physik hinsichtlich röntgenbasierter Analytik sowie der Elektronenmikroskopie erlaubt eine umfassende Charakterisierung der im Reinraumlabor prozessierten Funktionselemente. Zusätzlich wurden Präparationsverfahren wie die Atomlagenabscheidung (ALD) etabliert. Die Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ ist aktuell vor allem durch ihre Forschung auf dem Gebiet der kristallphysikalischen Analyse und Modifizierung von Materialien und deren Eigenschaften, insbesondere von Kopplungsphänomenen für die Datenspeicherung und Energie- und Stoffwandlung, sowie die Ausrichtung zweier internationaler Tagungen in Freiberg im Jahr 2013 sichtbar geworden.

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dirk C. Meyer hat zurückliegend Halbleiter und Schichtsysteme für unterschiedliche Anwendungen mit strukturellem Akzent sowie hinsichtlich verschiedener Herstellungsprozesse bearbeitet. Zur Spektroskopie konnte auch umfassend methodisch – hier insbesondere unter Nutzung von Röntgenstrahlung – beigetragen werden. In der jüngeren Zeit haben oxidische Halbleiter sowie kristalline Materialien mit elektrisch polarer Achse einen besonderen Stellenwert der Arbeiten erlangt, wobei sich der Bogen von der Herstellung über die Modifizierung und Charakterisierung bis hin zu den Anwendungen erstreckt. Hinsichtlich der Synthese, Charakterisierung



und Modellierung bestehen intensive Kooperationen, u. a. mit mehreren Fraunhofer-Instituten in Sachsen, dem Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. In besonderem Umfang wird die Arbeitsgruppe für die Charakterisierung und die Beeinflussung der Strukturbildung auch zukünftig die Synchrotronstrahlung an Großforschungszentren nutzen, wozu aus der zurückliegenden Zeit umfangreiche Erfahrungen existieren. Aktuell besteht unter Entsendung eines Mitarbeiters eine Beteiligung am Aufbau eines neuen Strahlrohres am Synchrotron Petra III des DESY in Hamburg zur Einrichtung einer *Chemical Crystallography Beamline*. Methodisch liegt der Schwerpunkt dabei auf der Entwicklung einer elementspezifischen und atomlagen-sensitiven Variante der Röntgenspektroskopie.

Herkunft der Arbeitsgruppe

Prof. Dirk C. Meyer ist kristallographisch orientierter Festkörperphysiker. In seiner Promotion beschäftigte er sich mit der Struktur und den Anwendungen von Halbleitern und Nanometerschichtsystemen. Die Anwendungsbereiche lagen dabei vorwiegend in den Bereichen der Röntgenoptik und Sensorik sowie der Datenspeicherung. Enge Kooperationen, insbesondere im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereiches 422 „Strukturbildung und Eigenschaften in Grenzschichten“, des Sonderforschungsbereiches 463 „Seltenerd-Übergangsmetallverbindungen: Struktur, Magnetismus und Transport“ sowie der DFG-Forschergruppe 520 „Ferroische Funktionselemente: Physikalische Grundlagen und Konzepte“ kennzeichneten seine Arbeit und das Bestreben, jeweils entlang einer geschlossenen Kette, ausgehend von der Synthese über die Kristallstruktur und Grenzflächenmorphologie bis hin zu den Eigenschaften und Anwendungen zu arbeiten.

Begleitend hat Prof. Dirk C. Meyer zur methodischen Entwicklung im Bereich der Röntgenanalysemethoden, hier insbesondere mit frühen Arbeiten zur quantitativen Ausarbeitung der Methode der *Diffraction anomalous fine structure* (DAFS) und der Kombination von *X-ray absorption fine structure* (XAFS) und *X-ray standing waves* (XSW) in einem Experiment, beigetragen. Diese Arbeiten wurden durch die Verleihung des Max-von-Laue-Preises der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie im Jahre 2004 herausgehoben gewürdigt. Hinzu kamen Arbeiten zur Instrumentierung von Synchrotronexperimenten, wie die Entwicklung und der Bau spezifischer Halbleiterdetektoren und Arbeiten für die digitale Signalverarbeitung zur Erweiterung des Dynamikbereiches dieser Systeme.

Während der Zeit als Leiter einer selbstständigen Nachwuchsgruppe und seiner Juniorprofessur für „Nanostrukturphysik“ baute Prof. Dirk C. Meyer an der TU Dresden eine Gruppe von insgesamt über 15 Diplomanden, Doktoranden und wissenschaftlichen Mitarbeitern auf. In den Bereichen Lehre und Forschung widmete er sich u. a. der Kristallographie und den Röntgenmethoden mit besonderer Intensität. Neben der Fortführung der methodischen Arbeiten unter Nutzung von Synchrotronstrahlung lag ein besonderer Arbeitsschwerpunkt auf Kopplungsphänomenen zwischen elektromagnetischen Feldern und der Kristallstruktur sowie deren Anwendungen für Funktionselemente. Aus diesen Vorarbeiten leitet sich auch der Zugang zu den heute im Fokus stehenden Fragestellungen ab.

Nach einjähriger Wahrnehmung einer Vertretungsprofessur für „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ am Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg folgte Prof. Dirk C. Meyer im Jahr 2009 dem Ruf der Bergakademie zur Übernahme dieser Professur. In diesem Zusammenhang entschied er sich gegen den Ruf einer anderen Universität sowie weitere Optionen. Thematisch stehen seither oxidische Verbindungshalbleiter bzw. Dielektrika, die häufig strukturelle Verwandtschaft zur Perowskitstruktur aufweisen, im Fokus, wobei die in dieser Materialklasse auftretenden Kopplungsphänomene besonders gewürdigt werden. Durch Einwerbung von Drittmitteln wurde die Infrastruktur der Arbeitsgruppe und des Instituts insbesondere im Hinblick auf die Syn-

these und Charakterisierung dünner Schichten stark ausgebaut. Die direkte Anbindung an das Zentrale Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg bildet eine ausgezeichnete Möglichkeit der Probenpräparation, die auch durch Investitionen von Seiten der Arbeitsgruppe erweitert wird. Als neue Methoden konnten auf diesem Wege die Atomlagenabscheidung und die Plasmaätzung im Reinraumlabor etabliert werden. Im Rahmen eines HBFG-Großgeräteantrages wurden die Charakterisierungsmöglichkeiten der hergestellten Schichten um ein kombiniertes Rasterelektronenmikroskop mit Ionenstrahl (REM/FIB) erweitert.

Seit dem Jahr 2010 ist Prof. Dirk C. Meyer gleichzeitig Prorektor der TU Bergakademie Freiberg sowie seit dem Jahr 2011 Direktor des Instituts für Experimentelle Physik. Prof. Dirk C. Meyer ist u. a. Leiter des BMBF-Verbundprojektes „CryPhysConcept“, das auf Grundlage der Kristallphysik Zukunftskonzepte für elektrochemische Energiespeicher entwickelt sowie Leiter der ESF-Nachwuchsforschergruppe „PyroConvert“, die auf die Bearbeitung pyroelektrischer Funktionsmaterialien für die Energie- und Stoffwandlung zielt. Seine bisherigen Arbeiten sind durch über 100 Publikationen in internationalen referierten Fachzeitschriften, Buchbeiträge und Herausgeberschaften sowie zahlreiche Patente und Patentanmeldungen dokumentiert. Im Juni des Jahres 2014 erscheint das Buch „Review on Electrochemical Storage Materials and Technology“ (AIP Proceedings Vol. 1597, Herausgeber Dirk C. Meyer und Tilmann Leisegang).

Wissenschaftliche Ausrichtung der Arbeitsgruppe

Dielektrika mit hoher Dielektrizitätszahl

Dielektrische Schichten mit hoher Dielektrizitätszahl („high- k “, $\epsilon_r > 10$) bilden eine wichtige Voraussetzung für die Konzeption elektronischer Bauelemente. Ihre Anwendung reicht von Gate-Dielektrika in MOS-Bauelementen, DRAM-Speicher kondensatoren und Stützkondensatoren bis hin zur Passivierung von Leistungsbauelementen. Darüber hinaus ist eine feldinduzierte und schaltbare Modifizierung der Leitfähigkeit u. a. für sogenannte „resistive Schalter“ und Speicherbauelemente interessant. Aus Sicht einer möglichst großen Bandlücke sind derzeit die Oxide und Silikate

des Hafniums und Zirkons besonders im Fokus. In der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperpektroskopie“ wird in diesem Zusammenhang seit geraumer Zeit an ternären Oxiden in Perowskitstruktur (insbesondere Strontium-/Titanverbindungen) gearbeitet. Aus der Untersuchung verschiedener Syntheseverfahren, der gezielten Modifizierung und Aktivierung von Oberflächen und anschließender struktureller Modifizierung ergibt sich ein immer noch rasch breiter werdendes Forschungsfeld.

Generell besteht für diese Systeme eine ausgesprochen starke Korrelation zwischen dem kristallinen Phasenbestand, den Realstrukturparametern, der Grenzflächenstruktur und den elektronischen Eigenschaften. Hierbei ist durch Kontrolle der Defekte in unterschiedlichen Dimensionen ein direktes Design der elektronischen Eigenschaften möglich. Diese können bei Steuerung der Defekte durch externe Felder auch schaltbar verändert werden. Für die Oxide haben Sauerstoffleerstellen als intrinsische Dotierzentren eine große Bedeutung. Infolge ihrer Ladung können sie im umgebenden Kristallgitter durch Anlegen elektrischer Felder gezielt bewegt werden. Die Arbeitsgruppe verfolgt daher in diesem Zusammenhang folgende Zielsetzungen, wobei jeweils ein Verbund aus Dielektrikum bzw. Halbleiter und Kontaktelktrode untersucht wird:

- Schalten struktureller und damit elektronischer Parameter an der Grenzfläche zwischen Dielektrikum und Kontaktelktrode,
- gezielte Einstellung der Grenzfläche durch Nasschemie und Plasmaätzen,
- Stabilisierung der kristallinen Phasen durch Dotierung im Kationen- und Anionengitter,
- Kontrolle der Verteilung von Sauerstoffvakanzien durch äußere elektrische Felder,
- Aufklärung und Nutzung des Zusammenhangs zwischen Punktfehlern im Anionengitter (Sauerstoffvakanz) und der Ausbildung flächenhafter Defekte und geordneter Stapelfehlervarianten (Oxidebenen einzelner Anionen) für das strukturelle Design am Beispiel ternärer Oxide mit Perowskitstruktur.

Die Schichtherstellung erfolgt vorwiegend auf atomarer Skala kontrolliert mittels ALD sowie chemischer und physikalischer Gasphasenabscheidung (CVD, PVD). Vergleiche zur Sol-Gel-Synthese und anderen nasschemischen Routen werden sehr häufig ange stellt. Einen wichtigen Aspekt stellt jeweils das Studium des Kristallisationsvorgangs dar, der entweder während der Herstellung durch Wahl geeigneter Prozessparameter oder nachgelagert durch weitere Prozessschritte (z. B. Temperaturbehandlung, Ionenimplantation) im thermodynamischen Gleichgewicht oder abseits davon erfolgen kann.

Modifikation und feldinduziertes Schalten von Grenzflächenstrukturen am Elektrodenkontakt

Die Grenzflächen zwischen dielektrischen, halbleitenden und metallischen Schichten bestimmen wesentlich die Eigenschaften elektronischer Bauelemente. Degradierung von Ladungsträgerbeweglichkeiten durch Grenzflächenzustände in MOS-Bauelementen (Dielektrikum–Halbleiter), Einsatzspannungsverschiebung durch Fermi-Level-Pinning (Metall–Dielektrikum), Schottky-Barrieren-Variation (Metall–Halbleiter) oder auch Oberflächenleckströme (Passivierungsschicht–Halbleiter) stellen international aktuelle Forschungsgegenstände, bei denen eine spezifische Oberflächenmodifikation die elektrischen Eigenschaften beeinflusst, dar. Die Arbeitsgruppe verfolgt insbesondere das gezielte strukturelle und damit elektronische Schalten an dieser Grenzfläche und ist bestrebt, durch Aufklärung der Degradierung eine gezielte Formierung der Leitfähigkeit für bestimmte Anwendungen zu ermöglichen. Während die strukturellen Änderungen, die unmittelbar das Dielektrikum oder den Halbleiter betreffen, jeweils separat bestimmt werden, ist dabei immer das Verhalten im Verbund mit der (zumeist metallischen) Kontaktelktrode von besonderem Interesse. Dazu existieren sehr aufschlussreiche Arbeiten am System Strontiumtitanat mit Metallelektroden unterschiedlicher Austrittsarbeiten, die momentan für Anwendungen in nichtflüchtigen resistiven Speichern, auch auf Grundlage anderer Verbindungen, weiter betrieben werden.

Elektrische Charakterisierung dielektrischer bzw. halbleitender Schichten

Die Charakterisierung elektrischer Eigenschaften dielektrischer bzw. halbleitender Schichten zur Analyse

fester Ladungen, von Grenzflächenzuständen und zum Leckstromverhalten erfolgt in der Arbeitsgruppe mithilfe klassischer Methoden wie Kapazitäts-Spannungs-Messungen und der Aufnahme temperaturabhängiger Strom-Spannungs-Kurven. Darüber hinaus werden spezielle Methoden zur Charakterisierung pyroelektrischer Materialien (u. a. in Form dünner Schichten) entwickelt. Diese Materialklasse zeichnet sich durch die Bereitstellung von Oberflächenladungen aufgrund von Temperaturänderungen aus und bietet ein großes technisches Potenzial, das innerhalb mehrerer von Prof. Dirk C. Meyer initiierten Forschungsprojekte in Anwendungen zur Energie- und Stoffwandlung umgesetzt wird. Die Herausforderung bei der Charakterisierung dieser Materialien besteht im Bereitstellen hoher Feldstärken und gleichzeitiger Vermeidung von Durchschlägen sowie der Separation von pyroelektrischen und thermisch induzierten Beiträgen zum Gesamtstrom. Der dafür realisierte Präzisionsmessaufbau erlaubt die temperaturabhängige Charakterisierung von Materialien unter hohen Feldstärken und wird daher auch für Stress-Tests weiterer Funktionselemente eingesetzt.

Strukturelle Modifizierung von Oberflächen und Dotierung mittels Ionen

Plasma- und ionenstrahlgestützte Prozesse erlauben eine gezielte und sehr gut steuerbare Modifizierung von Oberflächen bzw. von oberflächennahen Volumenbereichen. Während durch Plasmaätzen gezielt und reproduzierbar Oberflächenstrukturen (und entsprechende elektronische Zustände) hergestellt werden können, ist mittels Ionenimplantation auch das Einbringen geringster Dotierkonzentrationen möglich. Innerhalb des Virtuellen Instituts „Memriox“ wird die Ionenimplantation auf diesem Wege zur gezielten Herstellung resistiver Speicher ohne das Erfordernis einer elektrischen Formierung angewandt. Somit lassen sich einschlägige Bauteileigenschaften mit hoher Reproduzierbarkeit erzeugen.

Aktuelle Forschungsprojekte

Virtuelles Helmholtz-Institut MEMRIOX (VH-Vi-442)

Das Virtuelle Institut „Memriox“ (Virtuelle Institute stellen ein Förderinstrument der Helmholtz-Gemein-

schaft dar) ist eine Forschungsinitiative auf dem Gebiet Ionenstrahl-modifizierter, sogenannter memristiver Funktionselemente auf der Basis von Oxiden. Memristive Elemente sind passive Bauelemente, deren elektrischer Widerstand von der Vorgesichte abhängt (englisch Memristance = Memory + Resistance). Nanoskalige memristive Schalter könnten sich in Zukunft als ultimative nichtflüchtige Speicherzellen erweisen, deren Widerstand direkt durch einen elektrischen Strom geschaltet wird. Wissenschaftlich soll das Virtuelle Institut zur Intensivierung der Forschung jenseits der etablierten lagenweisen Kontrolle der natürlichen Defekte bei der Synthese memristiver Baulemente beitragen. Dafür wird ein breites Spektrum an Ionenstrahl-Techniken genutzt, um die Struktur kleinster ein- und zwei-dimensionaler Bereiche mit hoher räumlicher Genauigkeit zu modifizieren. Das Teilprojekt der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Herstellung dielektrischer Schichten durch ALD, die anschließend bei anderen Projektpartnern durch Ionenstrahl-Techniken modifiziert werden.

Teilprojekt „Defektstabilisierte Metalloxide für elektronische Bauelemente“ der sächsischen Landesexzellenzinitiative „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch atomares Design und Defekt-Engineering“ ADDE (SAB 100046905)

Im Rahmen des Teilprojektes „Defektstabilisierte Metalloxide als Dielektrika für elektronische Bauelemente“ steht die Untersuchung einer Vielzahl von Metalloxiden hinsichtlich ihrer Dielektrizitätszahlen und der Verwendung in Funktionselementen, vor allem nichtflüchtigen Speicherelementen, im Mittelpunkt. Dazu werden zum einen modifizierte, plasmabehandelte und dotierte Strontiumtitanat-Einkristalle und zum anderen dünne Schichten (SrTiO_3 , TiO_2 , Al-Si-O, ZnO) eingesetzt. Die Synthese der Oxidschichten erfolgt vorrangig mittels ALD, PVD sowie Sol-Gel-Methoden. Die Herstellungsprozesse dieser dielektrischen Schichten sollen dahingehend optimiert werden, dass die Kontrollierbarkeit auf atomarer Ebene gewährleistet wird. Da die elektronischen Eigenschaften oxidischer Halbleiter bereits durch geringe Abweichungen von der stöchiometrischen Zusammensetzung und der daraus resultierenden Realstruktur beeinflusst werden,

haben Defekte einen besonderen Stellenwert. Sie können als Punktdefekte, Defektcluster, aber auch als geordnete Stapelfehlervarianten auftreten. Als Punktdefekte werden hierbei vor allem Sauerstoffvakanz, induziert durch einen Reduktionsprozess, sowie deren Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften untersucht und diskutiert. Die Auswirkungen zweidimensionaler Gitterfehler werden anhand von Ruddlesden-Popper-Phasen $\text{SrO}(\text{SrTiO}_3)_n$ für $n = 1, 2, 3$ erforscht. Das Einbringen solcher Defekte in Dielektrika hat zur Folge, dass die elektrischen Eigenschaften von isolierend bis hin zu metallisch leitend gezielt eingestellt werden können. Basierend auf diesem Wissen lassen sich Einkristalle bzw. dünne kristalline Schichten mit Elektroden belegen und Metall/Halbleiter/Metall-Schichtstapel herstellen. An diesen Strukturen werden insbesondere die Metall/Oxid-Grenzflächen betrachtet und hinsichtlich schaltbarer struktureller Änderungen und Redoxprozesse sowie deren Speichereigenschaften untersucht.

BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept (BMBF 03EK3029A)

Das Verbundprojekt CryPhysConcept zielt auf die Entwicklung eines Zukunftskonzepts für elektrochemische Energiespeicher. Die Inhalte des Projekts werden auf S. 37 erläutert.

ESF-Nachwuchsforschergruppe PyroConvert (SAB 100109976)

Die Nutzung von Abwärme mit Hilfe pyroelektrischer Materialien ist Ziel der Nachwuchsforschergruppe PyroConvert. Dieses Projekt wird auf S. 39 ausführlich vorgestellt.

Geplante Vorhaben

Allen im Weiteren aufgeführten Projektthemen ist die Bezugnahme auf die strukturellen und elektronischen Eigenschaften dünner Schichten und von Oberflächen sowie deren gezielte Modifizierung und Korrelation sowie die Überleitung in integrierte Funktionselemente gemein. Besonderes Interesse kommt dabei den Defekten in verschiedenen Dimensionen und hier vor allem den Grenzflächen zwischen Schichten und Elektrodenkontakte sowie am Substrat zu.

Dielektrische Schichten

Ein wichtiges Ziel ist die gezielte Präparation dielektrischer Schichten, wobei hier insbesondere die Möglichkeit der Kontrolle auf atomarer Skala und die entsprechende Widerspiegelung der strukturellen Feinheiten in den dielektrischen Eigenschaften – bei- des unterlegt durch umfangreiche Charakterisierung – neue Erkenntnisse erwarten lässt. Anknüpfend an die in der Literatur berichteten Ergebnisse zahlreicher internationaler Arbeitsgruppen wird das Potenzial der Metalloxide, speziell des Hafniums und des Zirkons für die Substitution von Siliziumdioxid für verschiedene Anwendungen bearbeitet. Hierbei bestehen Herausforderungen dieser sogenannten *High-k*-Materialien in der Schichtstabilität im Zusammenhang mit unterschiedlichen Defekten. Eine Erweiterung wird die Untersuchung im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der aus den beschriebenen Materialien abgeleiteten Bauelemente darstellen. Hierbei kommt den Sauerstoffvakanz als bei Raumtemperatur beweglichstem Defekt eine besondere Bedeutung zu. Da aufgrund des Strebens nach Ladungsneutralität auch die Defekte im Kationengitter betroffen sind, sollen gezielte Änderungen der Zusammensetzung in diesem Untergitter – analog zum Konzept der defektstabilisierten Metalloxide – realisiert und deren Einfluss ausführlich untersucht werden. Dafür kann zunächst mit der Einbringung weniger Fremdatome begonnen werden, wodurch die Austrittsarbeit gezielt beeinflussbar ist. Als Pendant zu Sauerstoffleerstellen sollen zusätzliche Wasserstoffatome in die Schichten bzw. in deren Grenzflächenbereichen eingebracht und auch wieder kontrolliert entfernt werden. Während der mögliche Einfluss auf die elektronische Struktur prinzipiell bekannt ist, kommt der Frage der Immobilisierung der Protonen und so der Stabilisierung der elektronischen Eigenschaften hohe Bedeutung zu.

Metall-Halbleiter-Grenzflächen

Ein besonderer Fokus liegt auf den strukturellen und elektronischen Einflüssen von Defekten an der Grenzfläche zwischen metallischen Kontaktelktroden und oxidischen Halbleitern. Dabei spielt ein Sauerstoffdefizit als Ursache eine wichtige Rolle. Da sich die lokale Konzentration von Sauerstoffleerstellen auch durch elektrische Felder einstellen lässt und angenommen wird, dass durch solche Felder bei vergleichsweise geringeren Feldstärken zwischen ver-

schiedenen Grenzflächenstrukturen bei vorliegendem Sauerstoffdefizit reversibel bei Raumtemperatur „geschaltet“ werden kann, ergibt sich ein technologisch sehr effizientes und in wichtigen Teilen neues Verfahren für nichtflüchtige Speicherelemente. Die entsprechenden Defektstrukturen werden in Herstellung, Modifizierung durch Ionenimplantation und Modellierung umfassend berücksichtigt. Als Basissystem diente bisher Strontiumtitanat, zu dem erfolgreiche Vorarbeiten der Arbeitsgruppe existieren. Als Punktdefekte werden Leerstellen in den Strontium- und Sauerstoff-Untergittern betrachtet, wobei sich das Vorliegen eines relativen Überschusses an SrO als besonders interessant erwies. In diesem Falle ist im thermodynamischen Gleichgewicht die Bildung der kristallinen Vertreter einer homologen Reihe, der sogenannten Ruddlesden-Popper-Phasen (RP-Phasen), zu erwarten. Diese können als geordnete Serie chemischer Stapelfehler beschrieben werden. Sie leiten sich aus der Perowskitstruktur des Strontiumtitanat durch den Einbau zusätzlicher SrO-Ebenen in [001]-Richtung, begleitet von einer Scherung in Richtung $[1/2\bar{1}0]$, ab. Diese RP-Phasen mit der Zusammensetzung $\text{SrO}(\text{SrTiO}_3)_n$ lassen sich für SrTiO_3 bis zum Vertreter $n = 3$ direkt durch einen SrO-Überschuss bei der Kristallzüchtung herstellen (bisher nur für Pulver und dünne Schichten berichtet). Die Bildung der geordneten Defektstruktur der RP-Phasen ist in den Übergangsbereichen direkt mit dem Vorliegen von Punktdefekten verknüpft. Infolge der Möglichkeit, die Sauerstoffleerstellen auch durch elektrostatische Felder zu bewegen, ist somit eine Bildung von Defekt-Phasen und gegebenenfalls auch deren Rückbildung in entsprechend kontaktierten Kristallen zu erwarten, was in Einklang mit eigenen röntgenographischen Experimenten, die *in situ*

unter Feldwirkung durchgeführt werden, steht. Insgesamt sind also unter der Wirkung elektrostatischer Felder im Falle des SrTiO_3 insbesondere im oberflächennahen Bereich (an den Grenzflächen zu den Elektroden) strukturelle Modifizierungen zu erreichen, welche die elektronische Struktur beeinflussen. Die Einstellung einer bestimmten Ausgangssituation an der Grenzfläche durch Modifizierung der Kristall- bzw. Schichtoberfläche vor der Elektrodenabscheidung ist ein weiterer Ansatzpunkt.

Strukturelle Modifizierung von Oberflächen durch Dotierung mittels Ionen

Plasma- und ionenstrahlgestützte Prozesse erlauben eine gezielte und sehr gut steuerbare Modifizierung von Oberflächen und daran angrenzenden Volumenbereichen. Mittels Ionenimplantation können geringste Dotierkonzentrationen in Materialien eingebracht werden. Dabei ist es möglich, diese Einflüsse bei Raumtemperatur wirksam zu machen, womit die vorhandene Grundstruktur stabilisiert wird und die für andere Verfahren, wie etwa thermische Diffusion, bestehenden thermodynamischen Randbedingungen entfallen. Entwicklungsarbeit ist hinsichtlich der Thermalisierbarkeit der kinetischen Energie der Ionen und deren Limitierung bei Bereitstellung aus konventionellen Quellen zu leisten, um auch Implantationsstiefen auf der Skala von Nanometern zu erhalten („flache Dotierung“). Derzeit ist oft noch eine auf die Implantation folgende thermische Mobilisierung der Dotierstoffe erforderlich. Die einschlägigen Arbeiten sollen methodisch zur Entwicklung und Applikation von Ionenprozessen auf Grundlage von Plasmaquellen bzw. im Zusammenhang mit etablierten Plasmaätzprozessen beitragen.



Die Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ (von links oben nach rechts unten):

Marco Herrmann, Valentin Garbe, Ralph Strohmeyer, Emil Dieterich, Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Rocco Liebschner, Tina Weigel, Thomas Köhler, Dr. Hartmut Stöcker, Dr. Tilmann Leisegang, Diana Karsch, Bianca Störr, Doreen Eger, Maximilian Sonntag, Matthias Zschornak, Dr. Günter Gärtner, Alena Raatz, Dr. Barbara Abendroth, Falk Meutzner, Dr. Claudia Funke, Dr. Hartmut Bergelt, Dr. Wolfram Münchgesang, Dr. Juliane Walter, Juliane Hanzig, Dirk Prsa, Uta Fischer, Mandy Koitzsch, Melanie Nentwich, Stefanie Schlesinger, Christoph Irmer, Romy Rietzschel, Sven Jachalke, Solveig Rentrop, Tina Nestler, Dr. Teresa Orellana Pérez.

Arbeitsgruppe Prof. Hermann Ehrlich „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“

Am 25. Juli 2013 wurde Dr. Hermann Ehrlich zum Professor für „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“ am Institut für Experimentelle Physik berufen. Dadurch konnte die TU Bergakademie Freiberg eine W3-Heisenberg-Professur etablieren – ein Titel, welchen die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) speziell an Kandidaten verleiht, die an Universitäten ein neues Forschungsgebiet erschließen. Prof. Ehrlich will die Biomimetik und Biomineralisation mit den an der Bergakademie etablierten Feldern verbinden. Aufbauend auf seine Forschung will der Freiberger Wissenschaftler zudem den internationalen Masterstudiengang „Biomineralogy“ an der Ressourcenuniversität einrichten.

Durch die Ernennung von Dr. Hermann Ehrlich zum Professor wird die Basis gelegt, um das moderne Forschungsfeld der Biomineralogie und Biomimetik an der TU Bergakademie Freiberg erstmalig zu etablieren. Mit Prof. Ehrlich konnte ein international hoch anerkannter Wissenschaftler gewonnen werden, der durch seine neue Position und seinen wissenschaftlichen Fokus verschiedene Bereiche der Universität – angefangen von der Mineralogie und der Kristallographie über die Chemie und Festkörperphysik bis hin zur Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie – miteinander verknüpfen kann.

Im interdisziplinären Forschungsfeld der Biomimetik wird versucht, durch Nachahmung natürlicher Phänomene neue Technologien und Materialien zu entwickeln. Grundlage ist das Verständnis der Funktionsprinzipien natürlicher Vorgänge und deren Umsetzung in Form technischer Innovationen. Primäres Ziel der Arbeitsgruppe ist es, Mechanismen der Biomineralisationsprozesse von Organismen zu erforschen, die unter extremen natürlichen Bedingungen leben. So sind sie speziell an die Antarktis, an die hohen Drücke auf den Boden des Ozeans, an heiße vulkanische Quellen oder an extrem toxische Bedingungen angepasst. Ziel ist beispielsweise die Entwicklung einer neuen Generation von Biomaterialien und Bio-kompositen für die Technik und Biomedizin.



Um in der Biomimetik zu forschen, ist es unerlässlich die Prinzipien der Biomineralogie zu verstehen. Die Biomineralogie, ein Teilgebiet der Mineralogie, beschäftigt sich mit dem Verständnis der Steuerungsprozesse und dem gesamten Mineralisationskreislauf (Biomineralisation, Demineralisation und Remineralisation) in der Natur. Der Fokus des neuen Freiberger Professors liegt besonders auf dem Gebiet Biomineralisation. Als Biomineralisation wird der Vorgang bezeichnet, bei dem infolge der Lebenstätigkeit von Organismen Biominerale entstehen – Perlen, Muschelschalen oder Glasschwämme beispielsweise. Die physiologischen Abläufe, bei denen Biominerale abgeschieden werden, sind über Millionen von Jahren durch natürliche Selektion entstanden und spielen eine große Rolle bei der Entstehung des Lebens auf unserem Planeten. Biomineralisation findet beispielsweise beim Auf-, Um- und Abbau von Schalen und Skeletten statt, aber auch bei der Bildung von Nieren- und Gallensteinen im menschlichen Körper (pathologische Biomineralisation). Dabei nutzt die Natur bewundernswerte Synergieeffekte um eine Vielzahl von Zielen zu erreichen. So ist beispielsweise ein aktueller Forschungsgegenstand eine spezielle antarktische Fischart, die das Gefrieren ihrer Körperflüssigkeiten verhindert, indem sie Frostschutzproteine erzeugt. Das Ziel liegt darin, die Prozesse zu entschlüsseln, die sich bei der Knochenbildung unter dem Gefrierpunkt abspielen. Wenn es gelingt, die Prinzipien der Biomineralisation zu verstehen, die es Organismen erlaubt,

ben, unter extremen Temperaturbedingungen – also entweder zwischen -1,9 °C und 4 °C oder zwischen 60 °C und 98 °C – zu überleben, können komplett neue Biomaterialien und Biokomposite entwickelt werden, die sich durch hohe Hitze- und Druckbeständigkeit auszeichnen.

Prof. Hermann Ehrlich hat seine Promotion im Jahr 1984 als Biologe abgeschlossen. Anschließend war er als Forscher für das Max-Bergmann-Zentrum für Biomaterialien und das Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden tätig. Nach der Habilitation im Fach Biomaterialien an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel übernahm Prof. Hermann Ehrlich die Leitung der Gruppe „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“ am Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg. Im Jahr 2013 erhielt der Freiberger Forscher von der DFG die Heisenberg-Professur. Nach fünf Jahren wird die Stelle – nach einer erfolgreichen Evaluation durch die DFG und die Hochschule – in eine unbefristete Professur umgewandelt.

Prof. Ehrlich und seine Arbeitsgruppe veröffentlichten im Jahr 2013 mehrere Publikationen in renommierten Zeitschriften wie *Nature Scientific Reports*, *Proceedings of the Royal Society B*, *Journal of Materials Chemistry B*, *Materials Science and Engineering C*, *Journal of Structural Biology* und *Marine Drugs*. Insgesamt waren es 13 Artikel sowie zwei Kapitel in Büchern. Als herausragende Leistung im letzten Jahr präsentierte die Arbeitsgruppe in der Zeitschrift *Nature Scientific Reports* den Fund des Aminopolysaccharids Chitin in einem fossilen Hornkieselschwamm der Art *Vauxia gracilenta*, welches aus dem Präkambrium stammt.

Die ältesten bisher bekannten Chitinfunde waren mit 310 Millionen Jahren in der Kutikula eines Skorpions und mit 417 Millionen Jahren in einer Riesenkorpi-onkutikula (*Silurian eureptic*), welche im Jahre 2011 beschrieben wurden. Der von der Arbeitsgruppe untersuchte Fossilschwamm ist bereits 505 Millionen Jahre alt. So konnte durch mehrere moderne Analysen bestätigt werden, dass Chitin selbst unter drastischen Bedingungen (260 °C) über eine sehr lange Zeit haltbar ist. Der Erhalt von thermostabilem Chitin in alten Proben öffnet neue Wege für die Untersuchung von Fossilien verschiedener Zeitepochen.



Die Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“ (von links oben nach rechts unten): Toni Köppe, André Ehrlich, Dr. Vasili Bazhenov, Iaroslav Petrenko, Alexey Rusakov, Sabine Kaiser, Prof. Dr. Hermann Ehrlich, Izabela Zglobicka, Anton Nikolaev.

Schon im August 2013 – direkt im Monat nach der Berufung – präsentierte Prof. Ehrlich das 12. „International Symposium on Biominerallization“ BIOMIN2013 und zog damit 190 Wissenschaftler aus 35 Ländern, welche auf dem Gebiet der Biominerallisation forschen, nach Freiberg.

Dies ist besonders bemerkenswert, da das BIOMIN erst das zweite Mal überhaupt in Deutschland stattgefunden hat – letztmalig tagte das Symposium in Deutschland im Jahr 1970 in Mainz, dies war das erste Symposium dieser Reihe. In den letzten Jahren waren die Tagungsorte in den USA, in Japan, Holland, Monaco, Chile, China und Australien. Die Tagung bot eine großartige Möglichkeit etablierte Kontakte zu festigen und neue Kooperationspartner auf Freiberg aufmerksam zu machen.

Um in der Öffentlichkeit und beim Wissenschaftlernachwuchs Interesse und Neugier für die aktuelle Forschung auf den Gebieten der Biomimetik und der Biominerallisation an der TU Bergakademie Freiberg zu wecken, engagierte sich Prof. Ehrlich unter anderem bei Gastvorlesungen an anderen Universitäten im In- und Ausland oder durch die Präsentation von

thematischen Ausstellungen – beispielsweise der Präsentation von Forschungsobjekten, ausgestellt in der Terra Mineralia (siehe Bilder unten).

Für das Institut für Experimentelle Physik bedeutet die neue Professur eine Erweiterung des Profils, neue Ideenansätze, eine Bündelung von Forschungsaktivitäten und die Stärkung internationaler Kontakte. Aufgrund der zurückliegenden Neubildung der Gruppe wurden im Jahr 2013 noch keine Lehrveranstaltungen in Freiberg durchgeführt. Diese starten im Sommersemester 2014 mit dem Modul „Biominerologie“ für Masterstudenten der Angewandten Naturwissenschaft. Prof. Ehrlich hielt im Jahr 2013 bereits mehrere Gastvorlesungen an der TU Dresden und der Politechnika Poznanska (Polen).

Wissenschaftliche Ausrichtung

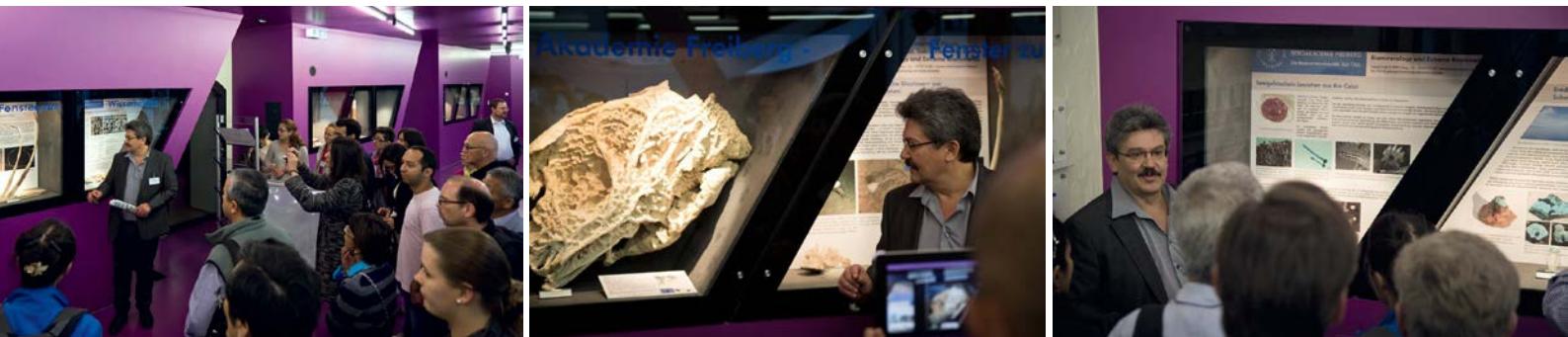
Die Freiberger Arbeitsgruppe besteht derzeit aus Wissenschaftlern aus vier Ländern und wurde im Jahr 2013 neu gebildet. Sie setzt sich zusammen aus Prof. Ehrlich, einem Postdoc, neun Doktoranden, einem Studenten und drei wissenschaftlichen Hilfskräften.

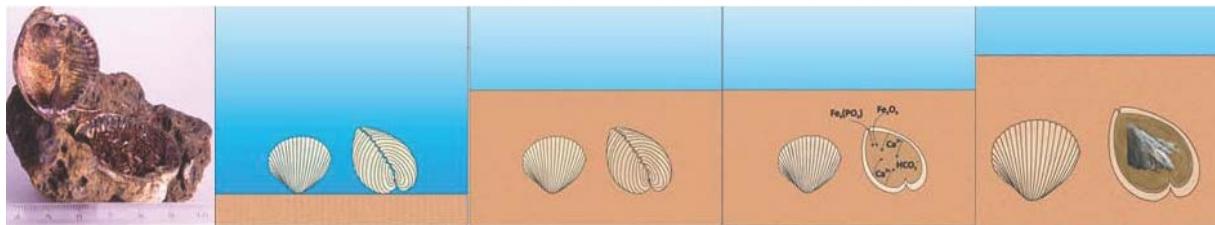
Für die Arbeitsgruppe stehen aufgrund ihrer grenzenlosen Vielfalt besonders Organismen marinen Ursprungs wie Schwämme, Kieselalgen, Fische, Krebstiere und Weichtiere wie Schnecken und Muscheln sowie Fossilien im Vordergrund, welche verschiedenartige Biominerale, beispielsweise in Form von Skeletten, Schalen und Zähnen bilden. So wurde beispielsweise untersucht, weshalb es möglich ist, dass kleine marine Ruderfußkrebse (Copepoden) mit ihren silikathaltigen Zähnchen Kieselalgen fressen können, die

ihrerseits eine Silikatschale besitzen, um sich gegen Fressfeinde zu wehren. Möglich ist dies durch die Verhärtung der Zahnspitzen durch ein Kupfer-Zink-Komposit, wie durch EDX-Analysen nachgewiesen wurde.

Die Biominerale besitzen einen amorphen, polykristallinen oder kristallinen Aufbau und können aufgrund der vorhandenen Infrastruktur am Institut für Experimentelle Physik hervorragend untersucht werden. So werden in der Arbeitsgruppe vorwiegend Röntgenbeugung, XPS sowie optische und elektronenmikroskopische Untersuchungen (REM, TEM, Fluoreszenz-, Konfokal- und Lichtmikroskopie) durchgeführt. Ferner bestehen intensive Kooperationen mit anderen Instituten, u. a. mit dem BESSY II in Berlin und der XFEL GmbH in Hamburg, um z. B. NEXAFS-Untersuchungen durchzuführen.

Unterschiedlichste organische Substanzen, wie beispielsweise Chitin oder Kollagen, werden auf Verwendungsmöglichkeit als Templat untersucht. Organische Template sind vorgeformte unlösliche makromolekulare Netzwerke, die eine Schlüsselrolle in der Biomineralisierung spielen, in die Regulation direkt eingreifen oder durch darauf gebundene Moleküle aktiv werden. Im Jahr 2013 wurden verschiedene Chitin-Komposite mittels hydrothermalen Synthesen erstmalig hergestellt. So wurde beispielsweise die Nutzung des Chitins als Templat zur Herstellung eines Chitin-ZrO₂-Hybridmaterials beschrieben. Dafür wurde α -Chitin-Gewebe aus dem Skelett des marinen Schwamms *Aplysina aerophoba* isoliert und unter hydrothermalen Bedingungen (150 °C) mit Ammoniumzirconium(IV)-carbonat als Präcursor umgesetzt, wobei sich das Hybridmaterial mit besonderen Eigenschaften bildete. Dieses wurde mittels FT-IR, SEM, HRTEM sowie Licht- und Konfokalmikroskopie untersucht.





Reines Chitin hat besondere Eigenschaften, ist biologisch abbaubar, ungiftig und biokompatibel, besitzt jedoch eine geringe mechanische Festigkeit. In der Vergangenheit zeigte die Arbeitsgruppe bereits, dass sich das Skelett mariner Schwämme, welches natürlicherweise aus chitin- oder kollagenbasierten Hybridmaterialien besteht, eine erhöhte mechanische Widerstandsfähigkeit besitzt, wodurch sich dieses besonders als Ausgangsmaterial zur Entwicklung bioinspirierter und spezieller bioabbaubarer Materialien eignet. Chitin degradiert erst bei Temperaturen zwischen 300 °C und 400 °C, wodurch es unter hydrothermalen Bedingungen beständig ist.

Vorteile der hydrothermalen Synthese liegen in den milden Prozessbedingungen im Vergleich zu anderen Synthesewegen (energiesparender Prozess, geringe Temperatur, abgasfrei sowie bessere Nukleation und Formkontrolle), wodurch sie besonders für die „Grüne Chemie“ attraktiv wird. So sollen die chitinhaltigen Gewebe im *Tissue Engineering* als Absorptionsmittel oder als Metallabscheidungsmaterial zur Produktion von Katalysatoren eingesetzt werden. Zirkoniumdioxid findet aufgrund seines geringen Ausdehnungskoeffizienten sowie hoher mechanischer und chemischer Stabilität Anwendung bei der Herstellung keramischer sowie isolierender Materialien und aufgrund der Redoxeigenschaften als Katalysator. Durch die Möglichkeit der Komplexbildung mit Aminen und Enzymen wird es weiterhin zur Produktion von Biosensoren eingesetzt und als wiedererneuerbare Elektrode in Biosensoren eingebracht. Ferner besitzt ZrO_2 photolumineszente Eigenschaften, wodurch es in preiswerten, effektiven und umweltfreundlichen Lumineszenzmaterialien eingesetzt wird. Gerade ein Hybridmaterial mit Zirkoniumdioxid war für die Arbeitsgruppe deshalb besonders attraktiv.

Eine herausragende Publikation der Arbeitsgruppe im Jahr 2013 in der renommierten Zeitschrift *Proceedings of the Royal Society of London* beschreibt den

Nachweis von Chitin in der Haftplatte des endemischen Süßwasserschwammes *Lubomirskia baicalensis* aus dem Baikalsee. Die Entdeckung des Chitins im Süßwasserschwamm ist bedeutend, da es die spezielle Funktion des Biopolymers in den alten sessilen wirbellosen Lebewesen bestätigt.

Die Themen der bearbeiteten Promotionsarbeiten sind sehr vielfältig und reichen von der kristallographischen Untersuchung des Hartgewebes von antarktischen Eisfisch-Arten, der Biomineralogie von Patina, der Biomineralogie an der Kiesellage *Didymo geminata*, über die hydrothermale Synthese von Metalloxiden an chitinhaltigen Substraten oder Spongin zur Zellbiologie bis hin zum *Tissue Engineering*. Die betreute Bachelorarbeit behandelte die Bildung von Vivianitkristallen in Eisenerzen und fossilen Mollusken aus der Region Kertsch (Ukraine). In der Arbeit wurde eine Hypothese zur Entstehung dieser Paläo-Biomineralien erstmalig präsentiert (siehe Abbildung oben).

Expeditionen

Im Jahr 2013 fanden zwei Expeditionen statt, an denen Mitarbeiter der Arbeitsgruppe teilnahmen. Die erste Expedition unter der Leitung von Prof. Broder Merkel führte vom 02.09. bis 13.09.2013 zur Äolischen Insel Panarea vor Sizilien. Panarea ist einer der aktivsten Vulkane Europas, wobei der Krater unterhalb der Wasseroberfläche liegt. Für die Wissenschaftler interessant sind sogenannte Fumarolen, also Stellen an denen heiße Gase, beispielsweise Schwefeldämpfe, aus dem Erdinneren austreten. Während der Expedition wurden von Freiburger Studenten im Rahmen der Ausbildung „Wissenschaftliches Tauchen“ ein Gelände auf dem Meeresgrund vermessen, Proben von Gesteinen, Pflanzen und ausströmenden Gasen genommen sowie ein Messgerät installiert, welches die austretenden Gasströme misst, um in Zukunft Vulkanausbrüche und Erdbeben vorauszusagen. Von der

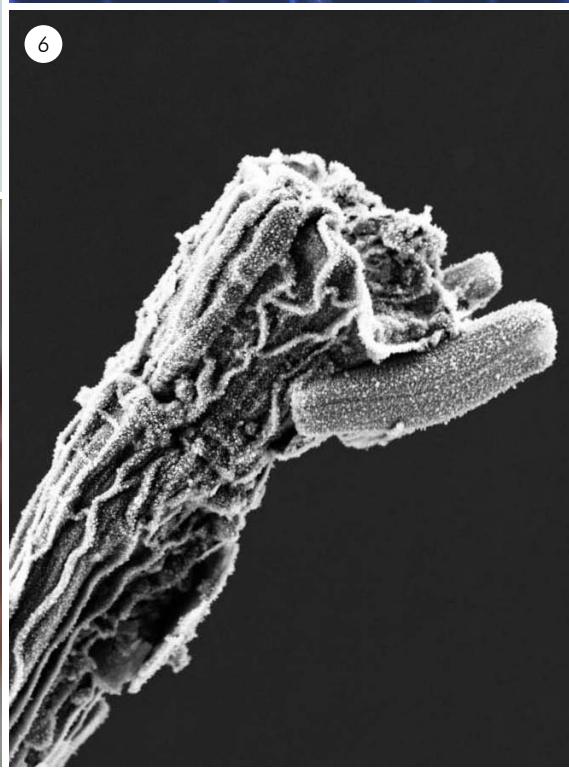
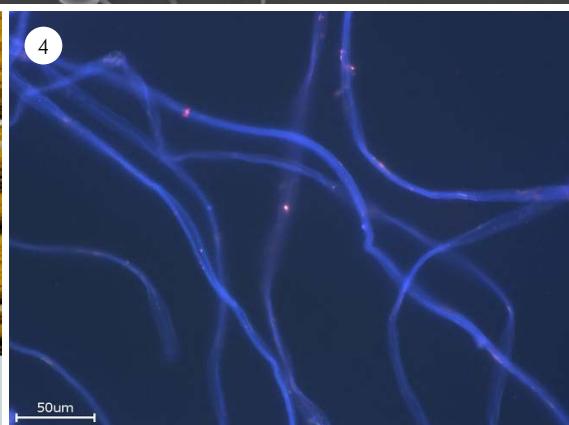
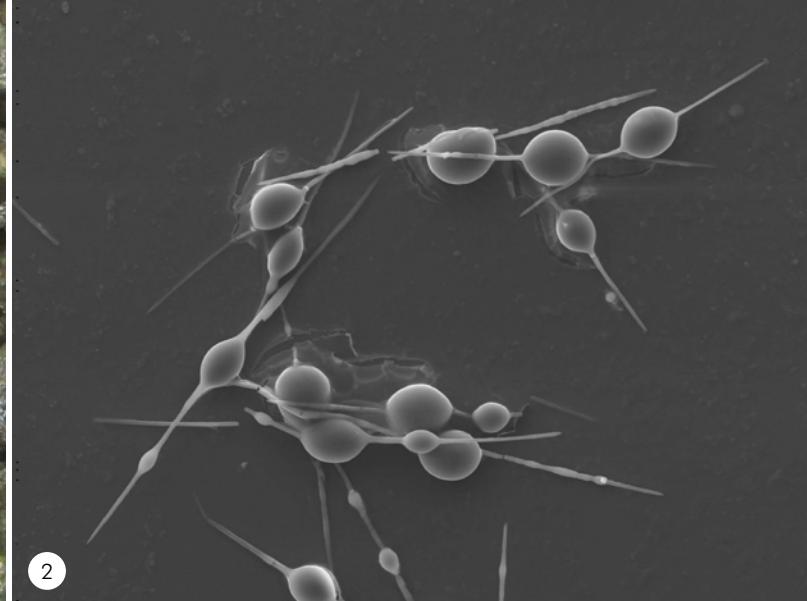
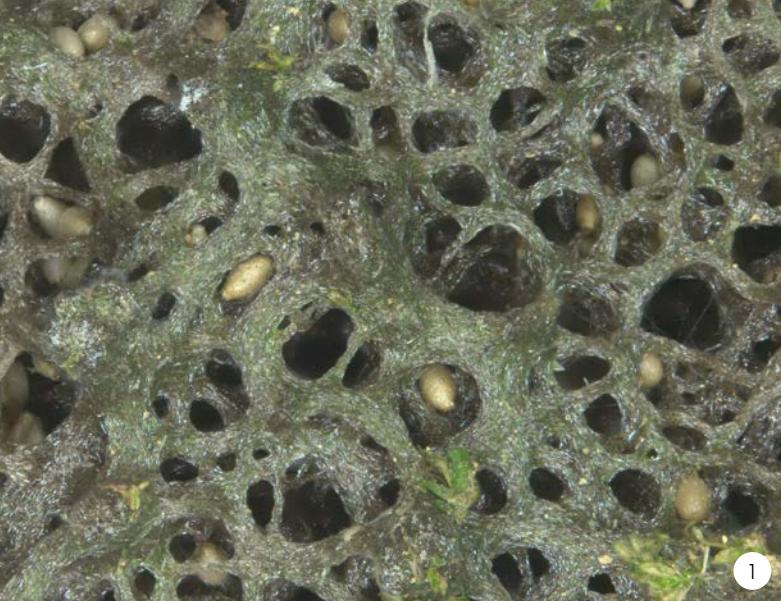
Arbeitsgruppe „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“ waren Wissenschaftler und Studenten beteiligt, um seltene Biomineralien- und andere Mineralienproben zu sammeln.



Die zweite Expedition, an der sechs Wissenschaftler der Arbeitsgruppe teilnahmen, wurde unter der Leitung von Prof. Dr. Hermann Ehrlich vom 18.09. bis 01.10.2013 durchgeführt und führte ins Kertschgebiet auf der Krim-Halbinsel. Die Region um die Stadt Kertsch auf der östlichen Seite der Halbinsel Krim ist bekannt für ihre Eisenerzvorkommen. Ziel dieser Expedition war es, in den Erzvorkommen Minerale sowie fossile Mollusken zu finden, diese zu bestimmen und zu analysieren. Insgesamt wurden drei verschiedene Paläo-Biominerale und fünf verschiedene Molluskenarten entdeckt und bestimmt.

Bilder auf der nächsten Seite:

- 1 Fragment eines seltenen brasilianischen Baumschwammes
- 2 Germanium-haltige Nadeln eines Süßwasserschwammes
- 3 3D-Simulation von Kupfer(II)-oxid auf einem Chitingerüst
- 4 Fluoreszenzaufnahme von Stielen einer Kieselalge
- 5 Mikroskopisches Bild von Kupfer(II)-oxid auf einem Chitingerüst
- 6 REM-Aufnahme der Kieselalge *Didymosphenia geminata*
- 7 Verschiedene Schwammproben im biomineralogischen Labor
- 8 Fluoreszenzaufnahme einer Kieselalge



Arbeitsgruppe Prof. Serguei Molodtsov „Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“

Der Rektor der TU Bergakademie Freiberg, Prof. Bernd Meyer, hat am 30. April 2013 Dr. Serguei Molodtsov zum Professor für „Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“ am Institut für Experimentelle Physik berufen. Als wissenschaftlicher Direktor ist Prof. Molodtsov für den Aufbau des European XFEL (engl. „X-ray Free Electron Laser“) in Hamburg mitverantwortlich. Für die TU Bergakademie Freiberg ergibt sich damit ein direkter Zugang zu den Möglichkeiten eines freien Elektronenlasers im Energiebereich der Röntgenstrahlung und einer Zeitauflösung bis 10^{-14} Sekunden.

Mit der Berufung Prof. Serguei Molodtsovs konnte ein weltweit renommierter Wissenschaftler für die TU Bergakademie Freiberg gewonnen werden, der die Zusammenarbeit mit internationalen Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Strukturaufklärung und Festkörperphysik entscheidend stärken wird. Bei dem Projekt bauen zwölf europäische Länder in der Metropolregion Hamburg eine überwiegend unterirdische Forschungseinrichtung, mit der pro Sekunde bis zu 27.000 Laserlichtblitze im Röntgenbereich erzeugt werden, deren Leuchtstärke herkömmliche Röntgenstrahlungsquellen milliardenfach übertrifft. Die einzigartigen Röntgenblitze des European XFEL eröffnen völlig neue Möglichkeiten für viele Bereiche der Forschung, denn mit ihnen lassen sich atomare Details von Viren und Zellen entschlüsseln, dreidimensionale Aufnahmen aus dem Nanokosmos anfertigen, chemische Reaktionen filmen und Vorgänge wie die im Inneren von Planeten untersuchen. Gerade auf dem Gebiet der Materialforschung sieht Prof. Molodtsov deswegen viele Anknüpfungspunkte mit der Freiberger Physik.

Im internationalen Umfeld der European XFEL GmbH können die Studenten der Bergakademie zukünftig bei Blockpraktika und Exkursionen die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Material- und Strukturforschung auf atomaren Niveau miterleben. Mancher von ihnen reist dann möglicherweise als Stipendiat der Humboldt-Stiftung an. Denn Prof. Molodtsov,



der selbst früher Alexander-von-Humboldt-Stipendiat war, will sich bei der Stiftung für die Förderung der Freiberger Studenten einsetzen. Zukünftig wird an der TU Bergakademie Freiberg das Modul „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern“ für Studenten der Angewandten Naturwissenschaft sowie der Nanotechnologie bzw. Elektronik- und Sensormaterialien angeboten.

Bereits seit dem Jahr 1981 arbeitet der gebürtige Leningrader auf dem Gebiet der Festkörperphysik und der Materialforschung. Er beendete 1984 sein Physikstudium an der Staatlichen Universität Leningrad, um drei Jahre später seine Dissertation zu verteidigen. Im Jahr 1993 schloss er seine Habilitation ab. Als Privatdozent war Prof. Molodtsov ab dem Jahr 2000 an der TU Dresden tätig. Seit 2010 ist er wissenschaftlicher Direktor des European XFEL in Hamburg.

Für das Institut für Experimentelle Physik bedeutet die neue Professur eine weitere Stärkung der Zusammenarbeit mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Dies betrifft besonders das Gebiet der Spektroskopie, Strukturaufklärung und Festkörperphysik. Damit wird das Potenzial für größere, durch die Physik getragene Forschungsverbünde sowie die Bearbeitung methodischer Entwicklungen innerhalb der Physik entscheidend gestärkt. Zusätzlich gewinnt natürlich das Angebot im Bereich der Lehre an Breite und Tiefe. Die Lehrbeiträge von Prof. Molodtsov werden u. a. die Beeinflussung von Materialien unter der Wirkung

hochintensiver elektromagnetischer Felder sowie die Charakterisierung der Dynamik elektronischer und struktureller Prozesse auf der Femto-Sekundenskala betreffen. Diese Bereicherung dürfte auch für andere Fakultäten hoch willkommen sein und wird zusätzlich die TU Bergakademie Freiberg international stärker sichtbar machen. In Erweiterung der laufenden Aktivitäten im Bereich der Nutzung der Synchrotronstrahlung (etwa der Beteiligung am Aufbau einer *Chemical Crystallography Beamline* an PETRA III in Hamburg) kann auch das neue Feld der Materialcharakterisierung und -synthese mit dem XFEL frühzeitig von Freiberger Seite mit gestaltet werden.

Der Bau des *European XFEL* ist ein hochkomplexes und technisch anspruchsvolles Vorhaben, das seit 2009 in Hamburg umgesetzt wird, mit Unterstützung durch zahlreiche Laboratorien und Länder Europas und darüber hinaus. Im Juni 2013 konnte der Bau der unterirdischen Gebäude unter Einhaltung von Zeit- und Kostenplan fertiggestellt werden. Die 4500 m² große Experimentierhalle und die Tunnel bieten seitdem ein beeindruckendes Bild für alle Besucher. Gleichzeitig haben die oberirdischen Gebäude am DESY in Bahrenfeld und am Osdorfer Born im Jahr 2013 große Fortschritte gemacht. Mit Abschluss der unterirdischen Bauarbeiten sind die Tunnel nutzbar für die Installation der Infrastruktur des Beschleunigers. Die Serienproduktion der Komponenten für den fast 2 km langen Linearbeschleuniger sowie die 500 m an Undulatoren hat begonnen. Die Leistungsfähigkeit der ersten der insgesamt 800 supraleitenden Beschleuniger-Kavitäten übersteigt meist sogar die geplanten Spezifikationen. Dies ist ein gutes Zeichen für die zukünftige Zuverlässigkeit des Beschleunigers. Außerdem konnte 2013 der erste Teil des Elektronen-injektors, die Elektronenquelle, installiert werden.

Ende 2013 waren mehr als 60 der 91 erforderlichen 5 m langen Undulator-Segmente fertiggestellt und

getestet. Erste Prototypen der 80 cm langen Röntgenspiegel lassen erwarten, dass die Spezifikationen eingehalten werden können. Zwei Segmente des zukünftigen *Large Pixel Detector* (LPD) und des *Adaptive Gain Integrating Pixel Detector* (AGIPD) konnten die erforderlichen Messraten erbringen, um mit der schnellen Pulsfolge des XFEL mitzuhalten. Erste Tests an anderen Freie-Elektronen-Lasern wurden durchgeführt. Die Entwicklung der Kontrollsysteme für Elektronen- und Photonenstrahl sowie von Hardware und Software für die Datenaufnahme konnte erfolgreich fortgesetzt werden.

Kritische Punkte entstanden allerdings im Zeitplan für die Produktion von Beschleunigerkomponenten. In Zusammenarbeit der beteiligten Partner mit dem XFEL-Management werden Gegenmaßnahmen entwickelt, um Auswirkungen auf den zukünftigen Zeitplan abzumildern. Das große Interesse der Nutzer ist eine starke Motivation, terminliche Verschiebungen zu verhindern.

Das wachsende Interesse der Nutzer zeigt sich auch an der stetig zunehmenden Teilnehmerzahl des jährlichen Nutzertreffens. Die sieben Nutzerkonsortien, die durch zusätzliche wissenschaftliche Instrumente und technische Infrastruktur zum *European XFEL* beitragen wollen, haben gute Fortschritte bei der Einwerbung der erforderlichen Mittel gemacht. Auch in bisher nicht am *European XFEL* beteiligten Ländern wächst das wissenschaftliche Interesse.

Die Fortschritte des Jahres 2013 wurden erst durch die Arbeit und Hingabe aller Beteiligten ermöglicht: Dies sind inzwischen über 200 direkte Angestellte, zahlreiche Kollegen am DESY, assoziierte Wissenschaftler in Konsortien und zahlreichen Komitees. All diesen und der wissenschaftlichen Gemeinschaft sei an dieser Stelle für ihr Vertrauen und Interesse am *European XFEL* gedankt.



Arbeitsgruppe Prof. Hans-Joachim Möller „Photovoltaik“

Die Professur für Experimentelle Physik I von Prof. Dr. H.-J. Möller war seit dem Jahr 1994 bis zu seinem Ausscheiden in den Ruhestand im Jahr 2011 ausgerichtet auf Halbleiterphysik mit dem Schwerpunkt auf photovoltaische Materialien. Seit der anschließenden Übernahme seiner Leitungsaufgaben am Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien (THM) in Freiberg werden diese Forschungsaktivitäten aber in einer Arbeitsgruppe Photovoltaik von ihm in Nebentätigkeit weitergeführt. Dies betrifft vor allem die Nutzung und Betreuung der speziellen photovoltaischen Messtechnik. Ein Teil der früheren Forschungsarbeiten wurde dazu in den letzten Jahren an das Fraunhofer THM überführt. Im Sinne der Kooperationsvereinbarung zwischen TU Bergakademie Freiberg und Fraunhofergesellschaft wird damit die Zusammenarbeit in spezifischer Form gefördert.

Die noch am IEP laufenden Aktivitäten konzentrieren sich auf die Untersuchung der strukturellen Eigenschaften von multikristallinem Silizium sowie deren Auswirkungen auf die elektrischen und optischen Eigenschaften. Dabei haben sich vier wesentliche Schwerpunkte gebildet:

- die Untersuchung von Stoff- und Transportvorgänge in Siliziumschmelzen und der Gasphase bei der Kristallisation,
- der Einbau von Fremdatomen und deren Verteilung im Kristall,
- die elektrische, optische und strukturelle Charakterisierung von Defekten, deren Entstehung und Auswirkungen auf die photovoltaischen Eigenschaften,
- die Untersuchung mechanischer Eigenschaften von Wafers (Bruchmechanik, innere Spannungen).

Einige der Forschungsarbeiten, die in den letzten Jahren bearbeitet wurden, betreffen ausgedehnte Kristalldefekte, vor allem Versetzungen und Oberflächen:

- So sind hauptsächlich Versetzungen für die Begrenzung des Wirkungsgrades verantwortlich. Die Rekombinationsaktivität der Versetzungen ist sehr variabel und hängt von der Dekoration mit Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und metallischen Verunreinigungen ab, die bisher aber nur teilweise identifiziert werden konnten. Es konnte gezeigt werden, dass die thermischen Bedingungen bei der Kristallisation wesentlich sind. Welche Bedingungen aber zu welcher Versetzungsichte und -verteilung im Kristallblock führen, muss detaillierter untersucht werden.
- Die Rekombinationsaktivität der Versetzungen, Korngrenzen und Ausscheidungen wird durch das Zusammenwirken mehrerer Faktoren bestimmt: die Anwesenheit bestimmter Verunreinigungen, deren Mobilität oder die Wechselwirkung mit anderen ausgedehnten Defekten. Diese Zusammenhänge werden grundsätzlich geklärt.
- Die ausgedehnten Defekte sind außerdem Speicher und Quelle für die mobilen Fremdatome. Je nach Prozessbedingungen werden Fremdatome entweder in das Volumen entlassen oder in den Defekten eingefangen. Die Wechselwirkungsprozesse quantitativ zu kennen ist daher entscheidend für die Frage, wie man ein Material verbessern kann und im Solarzellenprozess weiterbehandeln muss.
- Die Hauptverunreinigungen Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff treten in unterschiedlichen Konzentrationen, je nach Material, auf und können zu großen Ausscheidungen führen. Wegen der zum Teil hohen Konzentrationen kann Ausscheidungsbildung bereits in der Schmelze stattfinden und zu Ausscheidungsgrößen im Mikrometerbereich führen. Hierbei spielt die Wechselwirkung mit ausgedehnten Defekten, wie Korngrenzen und Versetzungen ebenfalls eine Rolle.
- Große Ausscheidungen können das elektrische Verhalten des p/n-Übergangs in der Solarzelle (den Emitter) verschlechtern.

Zur Untersuchung dieser Fragen werden hochauflösende Messverfahren zur Charakterisierung der wesentlichen physikalischen Parameter im Material und den Solarzellen benutzt. Dazu sind in der Vergangenheit topographische Messverfahren entwickelt worden, mit denen man zum Beispiel das lokale Rekombinationsverhalten, die lokale Stromausbeute oder die Defektdichten messen kann.

Spezielle Kenntnisse liegen auch bei der Anwendung von IR-optischen Transmissions- und Reflexionsverfahren zur Bestimmung von Dotierung, Ausscheidungen oder der Untersuchung von inneren elastischen Spannungen in den Wafern vor.

Die Photovoltaik-Gruppe am IEP befasst sich weiterhin mit der numerischen Simulation von Prozessen. Dazu gehören Wärme- und Stofftransportvorgänge in Schmelzen, die Versetzungsgeneration und die Simulation von Ausscheidungsvorgängen bei der Kristallisation von mono- und multikristallinem Silizium.

Verbundvorhaben SolarWinS BMU

Solar-Forschungscluster zur Ermittlung des maximalen Wirkungsgradniveaus von multikristallinem Silizium, Teilprojekt „Wechselwirkung von Fremdatomen mit Versetzungen und Korngrenzen“, www.solarwins.de

In diesem Verbundprojekt arbeiten zehn Forschungsinstitute zusammen mit der Solarindustrie an der Verbesserung von Solarsilizium. In den eigenen Arbeiten soll grundsätzlich die elektrische Aktivität von Versetzungen untersucht werden. Diese Aktivität wird im Wesentlichen durch die Kontamination mit Fremdatomen bestimmt. Daher ist es das Ziel dieser Untersuchungen, die relevanten Fremdatome und deren strukturelle Eigenschaften zunächst zu identifizieren. Im zweiten Schritt sollen dann die Wechselwirkung mit Versetzungen und die elektrischen Auswirkungen untersucht werden.



Projekte (auslaufend) im Jahr 2013

Verbundvorhaben

Spizencluster-Solarvalley: ThinWafers

„Herstellung, Handling und Reinigung ultradünner Wafer“, Teilprojekt TU Freiberg BMBF 03SF03388H, Laufzeit bis 31.12.2013

Verbundvorhaben

Spizencluster-Solarvalley Startverbund

$\chi\mu$ -Material Phase 2

„Materialien für ultradünne Siliziumsolarzellen“, Teilprojekt: „Verteilung von Verunreinigungen und Einfluss auf elektrische Eigenschaften von Solarsilizium und -zellen“, BMBF/BMFT 03SF0398J, Laufzeit 01.03.2009 bis 31.12.2013



Landesexzellenzinitiative auf der Basis von Spitzentechnologieclustern, Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch Atomares Design und Defekt-Engineering (ADDE)

Laufzeit: 2009 bis 2014, tu-freiberg.de/ze/adde

- Teilprojekt 2: Struktur-Eigenschaftskorrelation in multikristallinem Solarsilizium und Defekt-Engineering bei der Züchtung unter Verwendung von unterschiedlich reinem Ausgangssilizium
- Teilprojekt 3: Einfluss von Kristall- und Oberflächendefekten auf die mechanischen Eigenschaften ultradünner Siliziumwafer
- Teilprojekt 4: Herstellung und Eigenschaften nano- und mikrokristalliner Siliziumdünnschichten aus Oligosilanen für Solarzellen



Gast-Professor Ingo A. Schwirtlich

„Photovoltaik: Modultechnik und Modulmaterialien“

Die Gastprofessur von Prof. Dr. Ingo Schwirtlich ergänzt die Aktivitäten von Prof. Dr. H.-J. Möller im Bereich der photovoltaischen Materialien seit dem Jahr 2010. Es besteht daher eine enge Zusammenarbeit mit ihm im Rahmen von Projekten an der TU Bergakademie Freiberg und am Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM.

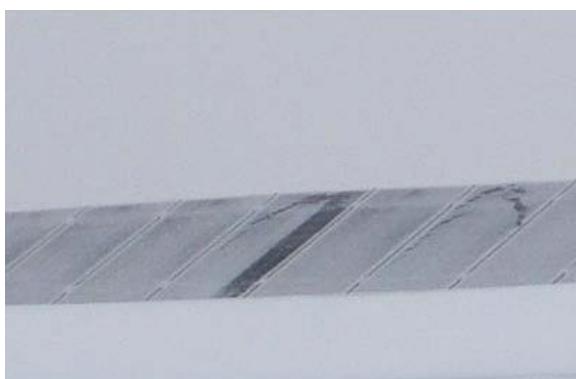
Die Herstellung von Photovoltaik-Modulen durch Bildung eines Sandwich-Laminates, das neben den Solarzellen aus einer Frontglasscheibe, Einkapselungsmaterialien sowie einer Folien- oder Glasmückseite besteht, scheint auf den ersten Blick keine besonderen materialtechnischen Herausforderungen zu enthalten. Verdeutlicht man sich jedoch die nicht unbeträchtliche Zahl von Grenzflächen zwischen den unterschiedlichen Materialien in einem Modulverbund und die Einwirkungen darauf durch äußere Parameter wie Feuchte, Temperatur bzw. Temperaturwechsel, Wärme, UV-Strahlung und die anliegenden elektrischen Potentiale, ergeben sich eine große Zahl von Wechselwirkungen, die diese Produkte im Einsatz erfahren.

Deutschland verfügt mit über 30 GW installierter Leistung über eine hohe Anzahl an Bestandsanlagen, von denen eine Lebensdauer von über 20 Jahren erwartet wird. Dies setzt voraus, dass man die zu erwartenden Wechselwirkungen in den Solarmodulen über die Zeit

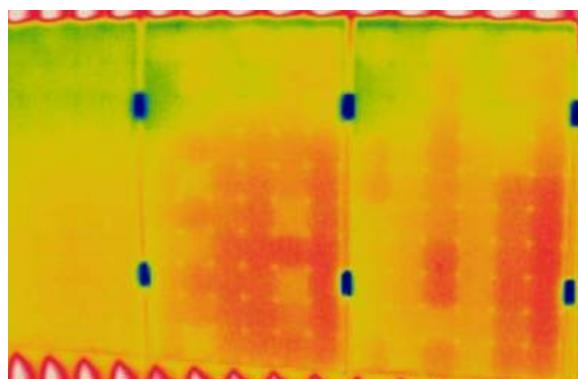
sowie in der gesamten Anlage versteht und geeignete Materialien auswählt, die mit angepassten und optimierten Prozessen verarbeitet werden.

In den letzten Jahren hat sich ein außerordentlich ernst zu nehmendes Degradationsphänomen bei vielen Solarmodulen im Feldeinsatz gezeigt, dessen endgültige Aufklärung noch aussteht, die „Potential-induzierte Degradation“. Sie tritt bei p-Typ-Solarzellen auf der Minusseite der Solarmodul-Strings auf und kann die Modulleistung um bis zu 60 % reduzieren. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem SolarValley Mitteldeutschland, der TU Bergakademie Freiberg und dem Fraunhofer THM in Freiberg wurde von der CEM Concept GmbH, ein von Prof. Dr. I. Schwirtlich gegründetes Unternehmen, eine Studie über dieses Thema durchgeführt, deren wesentliche Erkenntnisse auch in seine Wahlpflichtvorlesung eingehen. Die Studie wurde von der CEM Concept GmbH als Aufgabe M 670 des Unterprojektes μ -Module, Phase 2 „Potential Induced Degradation“, gefördert durch das BMBF, Förderkennzeichen 03SF0400B, durchgeführt.

Die elementare Vorstellung besteht darin, dass durch das negative Potential zwischen Solarzellen-Matrix und dem geerdeten Rahmen auf der Seite des Minuspols der Solarmodulstrings positiv geladene Ionen, die sich unter der Einwirkung von Feuchte, UV-Licht



Lokal schmelzender Schnee als Indikator einer erhöhten Betriebstemperatur in einer Solarzellenreihe innerhalb der Solarmodule.



Mittels einer Infrarotaufnahme verdeutlichte erhöhte Betriebstemperatur (rot) von Solarzellen innerhalb der Solarmodule (mit freundlicher Genehmigung des Fraunhofer THM, Freiberg).

und Temperatur in EVA (Ethyl-Vinyl-Acetat) basierten Einkapselungsmaterialien aus dem Deckglas gelöst haben können, zum negativen Emitter der Solarzellen wandern. Dort können sie eine dielektrische Doppelschicht bilden, die die Solarzellendiode in Durchlassrichtung polen kann. Gegenwärtig wird noch erforscht, ob dies vorzugsweise durch Ausbildung einer Inversionsschicht oder durch die Bildung elektrisch leitender Pfade in der Raumladungszone erfolgt. Die Tatsache, dass sich eine eingetretene Degradation durch Anlegen einer inversen Spannung unterstützt durch Feuchte und erhöhte Temperatur ganz oder teilweise wieder rückgängig machen lässt, kann mit den gegenwärtigen Modellvorstellungen noch nicht befriedigend erklärt werden.

Solarzellen, die innerhalb der Solarmodule von der „Potential-induzierten Degradation“ betroffen sind, können mittels Elektrolumineszenz-Aufnahmen oder wegen ihrer erhöhten Betriebstemperatur mit Hilfe von Infrarot-Kameras identifiziert werden. Unter Laborbedingungen stellen diese Techniken keine große Herausforderung dar. Um auch betroffene Module in einer Freifeldanlage identifizieren zu können, wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer THM die Flugthermographie entwickelt, bei der mit Hilfe kleiner Flugdrohnen, in diesem Fall mittels Oktokoptern, deren Software durch die CEM Concept GmbH weiterentwickelt wurde, Infrarotaufnahmen von installierten Photovoltaikanlagen angefertigt werden (rechte Abbildung). Bei günstigen Schneebedingungen lassen sich betroffene Module auch durch das Muster des abschmelzenden Schnees auf einfache Art und Weise identifizieren (linke Abbildung).



Methodisches Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien

Das Methodische Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien (MKEM) wurde im Rahmen des Sächsischen Landesexzellenzclusters „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch atomares Design und Defekt-Engineering“ (ADDE) im Jahr 2009 gegründet. Zum einen bietet das MKEM verschiedene Serviceleistungen sowie Zugang zu Forschungsinfrastruktur für hochschulinterne und -externe Gruppen mit dem Schwerpunkt auf Werkstoffen für die Photovoltaik, Mikroelektronik und Sensorik an. Innerhalb der TU Bergakademie Freiberg koordiniert das MKEM den Zugang zu den Anlagen des Zentralen Reinraumlabors (ZRL) und bietet Unterstützung bei der Planung und Durchführung der Prozessierung dünner Schichten und mikroelektronischer Bauelemente im ZRL. Zum anderen wirkt das MKEM als institutsübergreifende Schnittstelle zwischen den Betreibern einzelner Geräte und potenziellen Nutzern.

Die Kernkompetenzen des MKEM umfassen die Herstellungstechnologie, Materialphysik und Charakterisierung dünner Schichten. Diese Kenntnisse werden Kooperationspartnern sowie internen und externen Nutzern zur Verfügung gestellt. Insbesondere gilt dies auch für die Ausbildung von Studenten verschiedener Studiengänge (Bachelor und Master Angewandte Naturwissenschaft, Master Photovoltaik, Bachelor und Master Elektronik- und Sensormaterialien, Diplom

Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie). Das MKEM betreut und begutachtet studentische Graduiierungsarbeiten aus diesen Studiengängen.

Organisatorisch ist das MKEM an die Institute Experimentelle Physik und Elektronik- und Sensormaterialien angegliedert. Nach Ablauf der Projektzeit des Landesexzellenzclusters im Februar 2014 wird das MKEM als eigene Einheit des Instituts für Experimentelle Physik als Ansprechpartner für interne und externe Kooperationspartner bestehen bleiben. Im Folgenden werden die Arbeitsbereiche des MKEM näher vorgestellt.

Prozessierung und Strukturierung im Reinraumlabor

Das MKEM unterstützt interne und externe Nutzer bei der Planung und Durchführung der Prozessierung dünner Schichten und mikroelektronischer Bauelemente im Zentralen Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg. Das Reinraumlabor stellt seinen Nutzern die Infrastruktur für die Abscheidung dielektrischer und metallischer Schichten und deren laterale Strukturierung zur Herstellung elektronischer Bauelemente zur Verfügung. Eine typische Prozesskette beginnt mit der nasschemischen Reinigung der Silizium-Wafer von organischen und metallischen Verunreinigungen. Darauf folgt die Abscheidung der dünnen Schichten, die z. B. die Speicherinformation tragen oder den aktiven Sensor darstellen. Je nach Schichtsystem können im ZRL dafür verschiedene Anlagen zur chemischen und physikalischen Gasphasenabscheidung genutzt werden. Dielektrische Schichten können in der Verdampfungsanlage, durch Magnetronputtern im Ultrahochvakuum oder Atomlagenabscheidung hergestellt werden. Abbildung 1 zeigt die Magnetron-sputteranlage des ZRL. Diese bietet zudem die Möglichkeit Mischoxide oder Multilagen herzustellen. Die Atomlagenabscheidung (ALD) ist eine chemische Gasphasenabscheidung und wird für oxidische Materialien wie z. B. Al_2O_3 und TiO_2 verwendet.

Für das Schreiben, Löschen und Lesen von Speicherinformationen oder für das Auslesen eines Sensors werden abschließend metallische Schichten als elektrische Kontaktierung aufgebracht. Diese werden in



Abbildung 1: Magentronputteranlage mit Loadlock, Transfersystem, Oxid-Kammer und Metallkammer.

einer separaten Kammer der Magnetronputteranlage oder ebenfalls über thermisches Verdampfen hergestellt.

Um aus einem Schichtstapel ein Bauteil mit bestimmten elektronischen Eigenschaften zu machen, müssen die einzelnen Schichten lateral strukturiert werden. Über Fotolithographie werden die Teststrukturen auf dem mit Fotolack beschichteten Wafer vorgezeichnet und durch nasschemisches Ätzen oder einen Lift-off-Prozess auf die Schichten übertragen. Laterale Strukturgrößen können bis minimal etwa $5\text{ }\mu\text{m}$ realisiert werden. In vertikaler Richtung, also der Richtung der Schichtdicke, können die Strukturen auf nm-Skala hergestellt werden. Abbildung 2 zeigt als Beispiel den Ausschnitt eines Wafers mit Pt-Nb₂O₅-Pt-Kondensatorstrukturen für resistiv schaltende Datenspeicher. Auf diesem Wafer wurden verschiedene Teststrukturen realisiert, u. a. sogenannte Metall-Isolator-Metall-Crossbar-Strukturen mit Zellgrößen von $40000\text{ }\mu\text{m}^2$ bis $100\text{ }\mu\text{m}^2$, Van-der-Pauw-Strukturen und $15 \times 15\text{ mm}^2$ große Flächen für röntgenographische Strukturuntersuchungen am gesamten Schichtstapel. Abbildung 3 verdeutlicht die erzielbare laterale Strukturgröße. Hier ist eine Van-der-Pauw-Struktur einer aufgedampften Gold-Elektrode gezeigt. Die hellen Bereiche im Elektronenmikroskopiebild stellen die aufgedampften Gold-Elektroden dar, der dunkle Hintergrund wird von einer dielektrischen TiO₂-Schicht erzeugt.

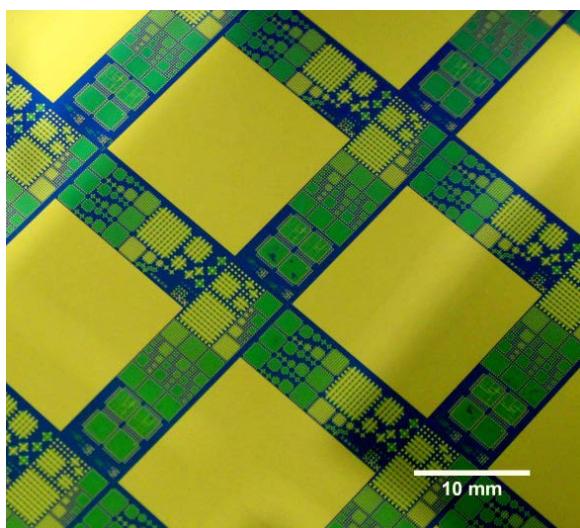


Abbildung 2: Ausschnitt eines Wafers mit Pt-Nb₂O₅-Pt-Kondensatorstrukturen für resistiv schaltende Datenspeicher mit MIM-Strukturen, Van-der-Pauw-Strukturen und große Flächen für Strukturuntersuchungen.

Oxidische Dielektrika und Halbleiter für Datenspeicheranwendungen – Einflüsse der Realstruktur auf die Funktionalität

Methodische Arbeiten des MKEM beschäftigen sich mit der Analyse und der Kontrolle der Realstruktur dielektrischer Schichten, die in der Regel weniger als 30 nm dick sind. Alleine durch diese Dimension bestimmt die Realstruktur einschließlich der Grenzflächen und Oberflächen die elektrischen Eigenschaften des Dielektriums. Zusätzlich kann durch den Abscheideprozess die Stöchiometrie des Oxides außerhalb des thermodynamischen Phasendiagrammes variiert werden. So können elektrische und optische Eigenschaften gezielt eingestellt werden. Der Hintergrund dieser methodischen Untersuchungen ist eine Anwendung dünner Übergangsmetallocide als Isolator in Metall-Isolator-Metall-Kondensatorstrukturen für Datenspeicher basierend auf einem Schalten des elektrischen Widerstandes.

Für das resistive Schalten wird die Eigenschaft vieler Übergangsmetallocide genutzt, dass die elektrische Leitfähigkeit durch Fremdelement-Dotierung, den Einbau von Sauerstoff-Fehlstellen oder Kationen-Redoxreaktionen über viele Größenordnungen variiert werden kann. Es wird also im Dielektrikum ein reversibler Durchbruch erzeugt, der als lokaler leitfähiger Pfad oder als virtuelle Kathode im Dielektrikum wirkt.

In Zusammenarbeit mit dem VI Memriox wird untersucht, wie mittels Ionenimplantation schaltende Pfade gezielt im Dielektrikum erzeugt werden können. Um die Effekte der Ionenimplantation von den Realstrukturparametern zu trennen, untersucht das MKEM systematisch die Einflüsse der Realstruktur und

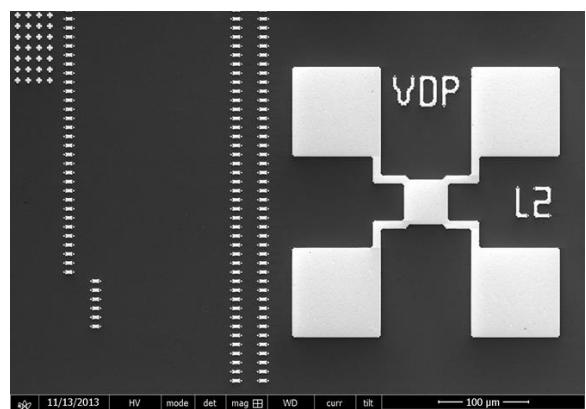


Abbildung 3: Van-der-Pauw-Teststruktur aus Gold auf TiO₂.

der Stöchiometrie des Dielektrikums auf das resistive Schalten. Diese Untersuchungen konzentrieren sich auf TiO_2 und SrTiO_3 als bekannte Referenzsysteme für binäre und ternäre Oxide.

In der Mikroelektronik wird TiO_2 wegen seiner hohen Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_r \approx 80$) als Hoch- ϵ -Dielektrikum (auch „high-k dielectric“ genannt) eingesetzt. SrTiO_3 besitzt ein noch höheres ϵ_r von 300 und wird daher ebenfalls bevorzugt als Hoch- ϵ -Material eingesetzt.

Die Struktur beider Materialien wird durch die oktaedrische Koordination des Ti^{4+} -Kations bestimmt. SrTiO_3 kristallisiert in der Perowskit-Struktur. Hier sind die TiO_6 -Oktaeder, wie in Abbildung 4 gezeigt jeweils über die Kanten miteinander verknüpft, während die großen Sr^{2+} -Ionen auf den Ecken der kubischen Elementarzelle platziert sind. Das TiO_2 kann in verschiedenen kristallinen Modifikationen vorliegen. Auch hier ist der TiO_6 -Oktaeder das zugrundeliegende Strukturmotiv und die Modifikationen wie z. B. Anatas und Rutil unterscheiden sich in der Art der Verknüpfung der Oktaeder. In Abbildung 4 ist als Beispiel die Struktur von Anatas gezeigt, bei der die TiO_6 -Oktaeder jeweils über vier Kanten miteinander verknüpft sind. Auch im amorphen Zustand, der typischerweise in Dünnschichten vorliegt, bleibt die sechsfache Koordination des Ti^{4+} als Nahordnung erhalten.

TiO₂-Phasendiagramm: Temperatur- und Schichtdickenstabilisation von Anatas durch eine TiN-Oberfläche

In den methodischen Arbeiten des MKEM in Zusammenarbeit mit dem VI Memriox wird die Atomlagenabscheidung für die Herstellung der dielektrischen Schichten verwendet, da mit diesem Verfahren insbesondere oxidische Schichten mit ausgezeichneten dielektrischen Eigenschaften und sehr hoher lateraler

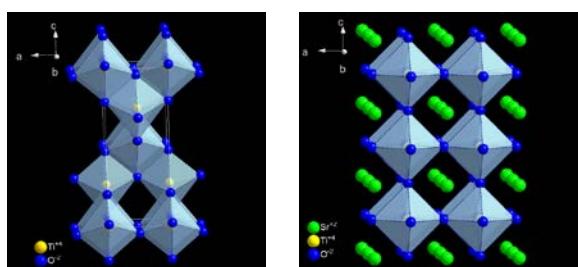


Abbildung 4: Anatas-Struktur (links) und SrTiO_3 -Struktur (rechts).

Homogenität bei gleichzeitiger Monolagen-genaue Kontrolle der Schichtdicke reproduzierbar erzeugt werden können.

Die Entwicklung der Mikrostruktur mit zunehmenden Abscheidetemperaturen und Schichtdicken wurde für TiO_2 -ALD untersucht. Dafür wurde der kristalline Phasenbestand der Schichten mit Röntgenbeugung unter streifendem Einfall (GAXRD) untersucht. Abbildung 5 zeigt als Beispiel GAXRD-Daten von TiO_2 -Schichten, die bei 250 °C abgeschieden wurden. Reflexe der Phasen Anatas, Brookit und Rutil können identifiziert werden. Mit zunehmender Schichtdicke von 10 nm bis ca. 18 nm nimmt die Intensität des Rutil-Reflexes zu, während das Signal von Brookit vollständig verschwindet. Für Schichtdicken bis 45 nm und Abscheidetemperaturen bis 320 °C wurde ein Phasendiagramm der während der Abscheidung entstehenden kristallinen Phasen erstellt, das in Abbildung 6 für die Abscheidung auf Silizium gezeigt ist. Für ALD-Prozesse unterhalb von 200 °C werden keine kristallinen Phasen beobachtet. Anatas und Rutil kristallisieren ab etwa 200 °C. Für Substrattemperaturen oberhalb 250 °C und Schichtdicken von mehr als 14 nm werden Anatas und Rutil immer gemeinsam beobachtet. Da Anatas immer die erste kristalline Phase ist, die entsteht, kann man davon ausgehen, dass Rutil immer auf einer Anatas-Oberfläche entsteht und im Weiteren beide Phasen gemeinsam wachsen. Es werden allgemein sehr breite Röntgenreflexe beobachtet, was darauf schließen lässt, dass die Größe der einzelnen Kristallite in der Größenordnung der Schichtdicke von etwa 20 nm liegt.

Beeinflussung der Mikrostruktur und der elektrischen Eigenschaften durch eine Al-Dotierung von TiO_2 -Schichten

Für die Verwendung als Dielektrikum in mikroelektronischen Bauteilen werden häufig amorphe Oxide eingesetzt, da Korngrenzen in kristallinen Materialien zu erhöhten Leckströmen führen. Insbesondere für das resistive Schalten, welches einen gezielten Durchbruch im Dielektrikum erzeugt, führen zufällige Leckpfade entlang von Korngrenzen zu schlechter Reproduzierbarkeit der Schaltkurven. Eine Möglichkeit die Kristallisation in TiO_2 während der ALD zu unterdrücken ist die gezielte Substitution von Ti^{4+} durch andere Kationen, wie z. B. Al^{3+} . Hierzu wurden in einer

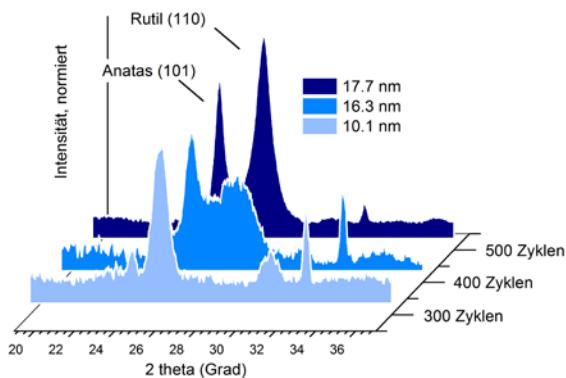


Abbildung 5: GAXRD-Daten für TiO_2 -Schichten, die bei $250\text{ }^\circ\text{C}$ abgeschieden wurden. Die Schichtdicken sind 10, 16 und 17 nm.

studentischen Graduiersarbeit MIM-Strukturen mit TiN-Bodenelektrode, $\text{TiO}_2:\text{Al}$ -Isolatorschicht und einer strukturierten Gold-Deckelektrode prozessiert. Die $\text{TiO}_2:\text{Al}$ -Schichten mit variierenden Al-Konzentrationen wurden dabei über einen ternären ALD-Prozess hergestellt. Dabei wird der Al-Gehalt in den Schichten über die Ti- und Al-Präcursor-Pulsverhältnisse gesteuert. Abbildung 7 zeigt die mittels Röntgenfluoreszenz gemessene elementare Zusammensetzung der $\text{TiO}_2:\text{Al}$ -Schichten für verschiedene Abscheidetemperaturen. Für Ti:Al-Pulsverhältnisse von 20:1 bis 1:1 steigt der Al-Gehalt in den Schichten von etwa 3,7 bis 23,2 At.-%. Es zeigt sich, dass die Abscheidetemperatur keinen Einfluss auf den Einbau von Al in TiO_2 hat.

Während undotierte TiO_2 -Schichten auf einer TiN-Bodenelektrode bereits ab einer Abscheidetemperatur von $200\text{ }^\circ\text{C}$ als Gemisch amorpher und kristalliner Bereiche mit Anatas-Struktur vorliegen und ab $250\text{ }^\circ\text{C}$

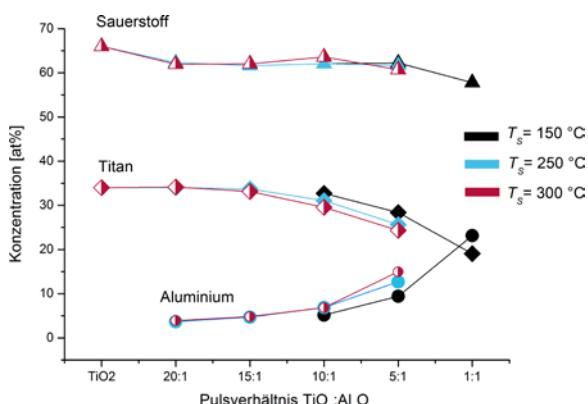


Abbildung 7: Elementzusammensetzung von $\text{TiO}_2:\text{Al}$ -Schichten, die aus XRF-Messungen bestimmt wurde. Die Schichtdicke ist in allen Fällen ca. 15 nm.

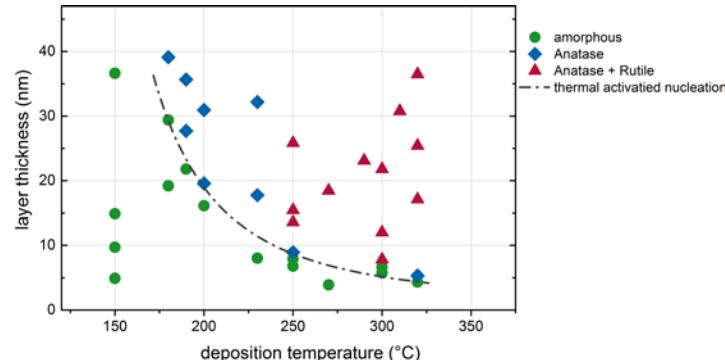


Abbildung 6: Für die Abscheidung auf Silizium zeigt das Diagramm in Abhängigkeit von Abscheidetemperatur und Schichtdicke die entstehenden kristallinen Phasen.

vollständig als Anatas, sind für Al-dotierte TiO_2 -Schichten für Abscheidetemperaturen bis $300\text{ }^\circ\text{C}$ keine kristallinen Phasen nachweisbar.

Die Charakterisierung des Leckstromverhaltens der TiN- TiO_2 -Au-Kondensatorstrukturen in Abbildung 8 zeigt, dass der Leckstrom mit zunehmender Abscheidetemperatur um mehrere Größenordnungen ansteigt. Dies geht einher mit dem zunehmendem Anteil kristalliner Bereiche in der Oxidschicht und bestätigt, dass Korngrenzen zu erhöhten Leckströmen führen.

Für das System $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ laufen weitere systematische Untersuchungen zum Ladungsspeicherverhalten und zum Durchbruchverhalten, welches für das resistive Schalten genutzt wird.

Anpassung der optischen und elektrischen Eigenschaften im System TiO_2-SrO

Im Vergleich zu TiO_2 weist SrTiO_3 sowohl eine höhere direkte Bandlücke als auch eine höhere Dielektrizitätskonstante ϵ_r auf. Das Gleichgewichtsphasendiagramm des Systems TiO_2-SrO sagt für TiO_2 -reiche Zusammensetzungen eine Entmischung in SrTiO_3 und TiO_2 voraus. Jedoch ist es mit der Atomlagenabscheidung möglich, amorphe Schichten mit beliebiger Stöchiometrie zwischen TiO_2 und SrTiO_3 herzustellen.

Der Einbau kleinerer Kationen wie Al^{3+} in TiO_2 erfolgt auf Zwischengitterplätzen oder substituierend auf den Ti^{4+} -Plätzen und stört so die Fernordnung der TiO_6 -Oktaeder. Dahingegen führt die Dotierung mit großen Kationen wie z. B. dem zweiwertigen Erdalkali-Kation Sr^{2+} zum Einbau dieser Kationen ausschließlich in

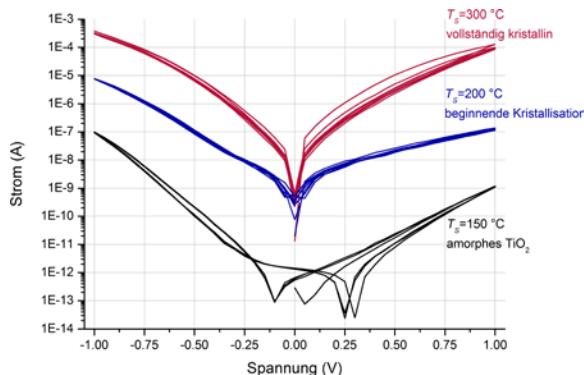


Abbildung 8: Leckstromverhalten undotierter TiO_2 -Schichten für eine TiN-TiO₂-Au-Kondensatorstruktur mit verschiedenen Abscheidetemperaturen.

den ausreichend großen Zwischenräumen der TiO_6 -Oktaeder. Sr-Ti-O-Schichten werden bei 320°C im amorphen Zustand abgeschieden. Während nachträglicher Temperung kann ab 450°C die Ausbildung der Perowskitstruktur des stöchiometrischen SrTiO_3 beobachtet werden.

Bis zu einem Sr/Ti-Verhältnis von 2/1 können auch SrO-reiche Schichten hergestellt werden. Reines SrO ist hygrokopisch und reagiert stark basisch. Bei einem ALD-Prozess wird daher bei einer weiteren Verschiebung der Zusammensetzung in Richtung SrO vorwiegend SrOH abgeschieden und die Schichten sind unter atmosphärischen Bedingungen nicht stabil.

In Abbildung 9 sind für einen TiO_2 -SrO-ALD-Prozess die Sr- und Ti-Elementgehalte in Abhängigkeit vom

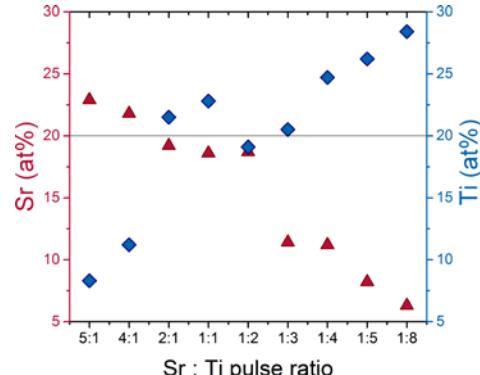


Abbildung 9: Sr- und Ti-Elementgehalte in Abhängigkeit vom Sr/Ti-Verhältnis in den Schichten. Die Schichtzusammensetzung wurde durch Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt.

Sr/Ti-Verhältnis in den Schichten dargestellt. Der komplexe Brechungsindex $N = n + ik$ (n : Brechungsindex, k : Extinktionskoeffizient) wurde für den Spektralbereich von 0,8 bis 6,5 eV durch spektroskopische Ellipsometrie bestimmt. Abbildung 10 zeigt eindrucksvoll, wie sich analog zur TiO_2 /SrO-Zusammensetzung die optische Bandlücke von 3,4 eV für TiO_2 -bis zu 4,4 eV für SrO-reiche Schichten verschiebt. Umgekehrt verringert sich der Brechungsindex (für 2 eV) von 2,3 auf 1,7 wenn die Schichtzusammensetzung von TiO_2 -reich zu SrO-reich variiert wird.

Zusammenfassung

Bisherige Arbeiten zielten darauf, die ALD-Prozesse für binäre und ternäre Oxide zu entwickeln und die Abscheideparameter zu optimieren. Insbesondere für die ternären Systeme SrO/TiO₂ und TiO₂:Al war die Reproduzierbarkeit der Schichtzusammensetzung ein kritischer Parameter. Neben der Einstellung der Prozesse wurden die grundlegenden Eigenschaften der Schichten untersucht: Zusammensetzung, Schichtdicke und -dichte, der kristalline Phasenbestand und optische Eigenschaften wie Bandlücke und Brechungsindex. In der Folge werden aufbauend darauf die elektrischen Eigenschaften eingehend untersucht. Während die Bandlücke und die Dielektrizitätskonstante vorrangig Materialeigenschaften sind, ist das Leckstrom- und Durchbruchverhalten stark von der Mikrostruktur abhängig.

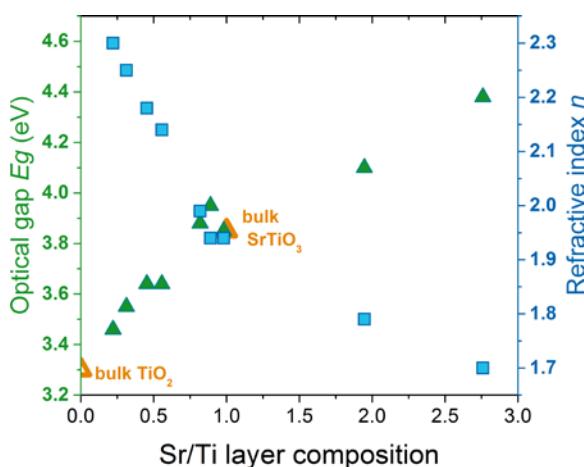


Abbildung 10: Optische Bandkante (gelb) und Brechungsindex bei 2 eV (blau) der SrO/TiO₂-Schichten in Abhängigkeit vom Sr/Ti-Verhältnis.

Methodisches Kompetenzzentrum NCrystED

Das Kompetenzzentrum NCrystED für N -dimensionale Kristallographie und röntgenographische Elektronendichtebestimmung bündelt die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu kristallinen Materialien, insbesondere Einkristallen, in der Region Freiberg und darüber hinaus. Die Kooperation zwischen Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien Freiberg und TU Bergakademie Freiberg bildet den Kern des Kompetenzzentrums. Mit besonderem Schwerpunkt werden Materialien mit komplexen strukturellen Feinheiten auf atomarer Skala, modulierte Strukturen und aperiodische Kristalle, bearbeitet. Hierbei werden moderne Methoden der Kristallographie auch temperaturabhängig eingesetzt:

- die Röntgeneinkristalldiffraktometrie,
- die röntgenographische Elektronendichtebestimmung, unter Einbeziehung der Maximum-Entropy-Methode und
- die N -dimensionale Kristallographie.

Insbesondere bilden experimentell bestimmte Elektronendichten die Schnittstelle zu theoretisch berechneten. Damit schließt das Kompetenzzentrum NCrystED die Freiberger Innovationskette zwischen Theorie und Experiment bzw. elektronischer Struktur und chemischen Eigenschaften. Im Fokus der Arbeiten stehen somit vorzugsweise einkristalline Materialien mit komplexen Strukturen aus den Bereichen der Energie- und Stoffwandlung, der Grundlagenforschung, der Mikroelektronik und der Sensorik.

Zurückliegend wurden Legierungsanoden für neuartige Ansätze elektrochemischer Energiespeicher untersucht (Abb. 1) sowie Materialien für die pyroelektrische Wasserstofferzeugung (Abb. 2).

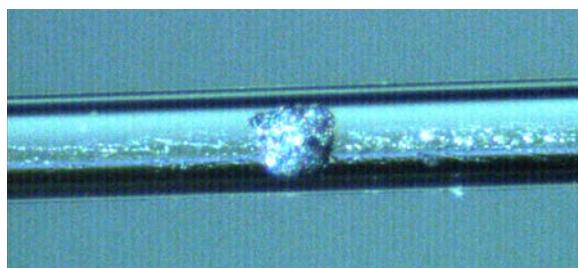


Abbildung 1: Probe einer Legierungsanode mit einem Durchmesser von ca. 150 μm luftdicht in einer Glaskapillare eingebettet (links). Die Röntgeneinkristallbeugungsaufnahme (rechts) weist auf unterschiedliche kristalline Phasen hin.

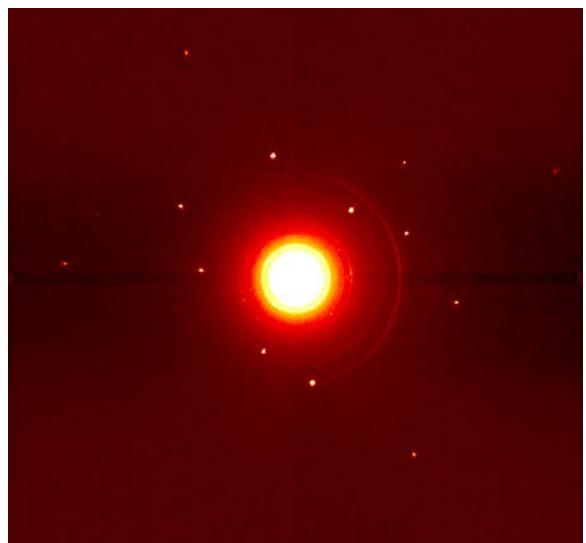
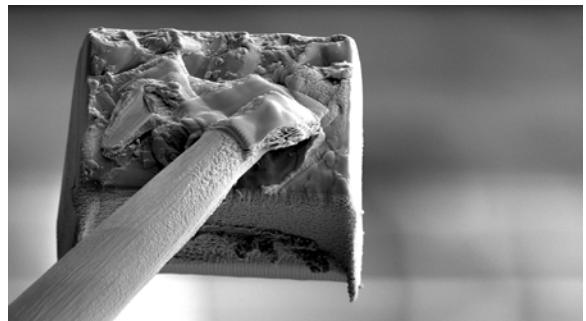
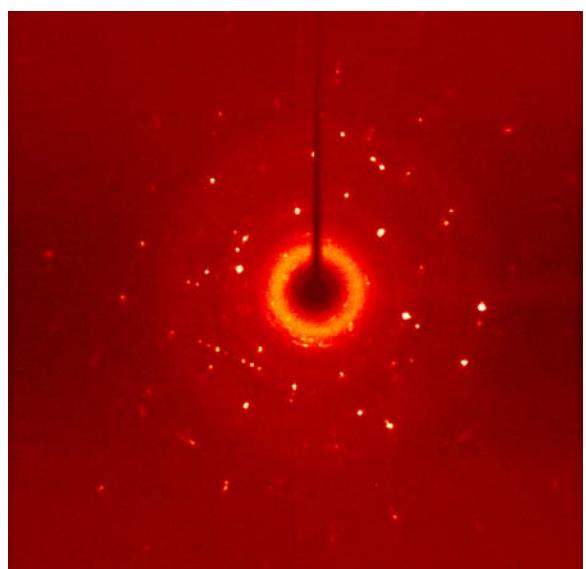


Abbildung 2: Mittels FIB präparierter Einkristall von ca. 50 μm Kantenlänge (oben). Anhand des Beugungsbildes (unten) lässt sich auf einen einphasigen Kristall schließen.



Projekte

BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept

Das Verbundprojekt CryPhysConcept zielt auf die Entwicklung eines Zukunftskonzepts für elektrochemische Energiespeicher sowie dessen Umsetzung und Heranführung an den Markt. Dabei sollen unter Leitung von Prof. Dirk C. Meyer moderne Methoden der kristallphysikalischen Struktur- und Eigenschaftsvorhersage, der Präparation sowie der Analyse skalenübergreifend im Zentrum der Arbeiten stehen. Diese werden von der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ koordiniert und maßgeblich umgesetzt. Weitere Verbundpartner sind die Arbeitsgruppe „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“, das Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM Freiberg, das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahlentechnik IWS Dresden, das Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e. V. Meinsberg und die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien e. V. Dresden-Rossensdorf.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, einen Beitrag zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energieträgern zu leisten sowie eine Erweiterung und Verbesserung des grundlegenden Verständnisses zur thermischen, elektrischen und stofflichen Speicherung von Energie anzustreben.

Elektrochemische Energiespeicher sind, neben ihrer Bedeutung für die Elektromobilität, insbesondere für den Ausbau dezentraler stationärer Anwendungen im Zusammenhang mit regenerativer Stromerzeugung unerlässlich. Dies betrifft zusätzlich zur Gewährleistung der Netzstabilität besonders den Ausbau regional autarker Energieversorgung.

Neben Beiträgen zur Fortentwicklung etablierter Technologien zielt das Vorhaben zentral auf die Bereitstellung von Modellen, die voraussichtlich vollkommen neue Systeme darstellen werden. Bezuglich der Leistungsparameter und dem erforderlichen Lastmanagement sollen diese ideal auf die Anwendungsfälle autarker Energieversorgungssysteme in Zusammenhang mit regenerativer Stromerzeugung unter Berücksichtigung strategischer Ressourcen-, Umwelt- und Kostenfragen angepasst sein.



CryPhysConcept

Mit Kristallphysik
zum Zukunftskonzept
elektrochemischer
Energiespeicher

Hierfür kommen moderne Methoden der Kristallographie, der Kristallchemie und der kristallphysikalischen Struktur- und Eigenschaftsvorhersage zum Einsatz. Die Klasse der oxidischen Kristalle steht besonders im Fokus des Projekts, da sie eine breite Palette von gekoppelten (Energiewandlungs-) Phänomenen aufweisen, welche bisher überwiegend Verwendung in elektronischen Bauteilen finden. Auch im Bereich metastabiler Zustände und thermodynamischer Phasenumwandlungen kristalliner Materialien liegen noch nicht gehobene Potentiale für stationäre Energiespeicher. Außerordentlich interessante Stoffe mit noch ungeahnten Potentialen stellen auch Biomineralien dar. Diese natürlichen Komposite sind wichtige Substanzen in der belebten Natur und hervorragend an Prozesse angepasst, die elektrochemischen vergleichbar sind. Im Rahmen des Projekts werden folglich auch diese Materialien und biomimetische Prinzipien hinsichtlich neuartiger elektrochemischer Speicherkonzepte untersucht.

Bisher wurden vier Patente für neuartige Konzepte zur Energie- und Stoffwandlung bzw. Energiespeicherung angemeldet. Weiterhin wurden 14 wissenschaftliche Artikel zur Veröffentlichung eingereicht, wovon neun bisher erschienen sind. Diese Arbeiten, sowie der Stand einzelner im Projekt bearbeiteter Themen, wurden in insgesamt fünf Beiträgen auf verschiedenen Konferenzen/Tagungen vorgestellt. Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit erfolgte ein Radiointerview sowie die Veröffentlichung weiterer vier Artikel im Projektzusammenhang in unterschiedlichen Medien. Im aufgebauten E-Science-System wurden im Berichtszeitraum etwa 1000 wissenschaftliche und 220 eigene Wiki-Artikel gesammelt.

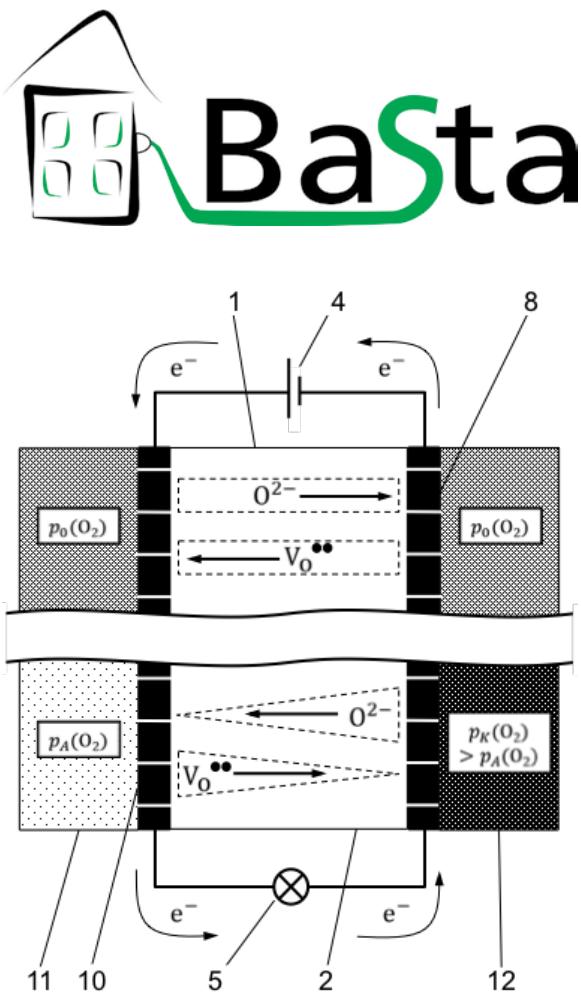
BMU-Verbundprojekt BaSta – Batterie Stationär in Sachsen

In dem durch das Fraunhofer IWS Dresden koordinierten Projekt werden die Forschungsaktivitäten von vier Fraunhofer-Instituten, dem Leibniz-Institut IFW, der TU Dresden und der TU Bergakademie Freiberg in besonderer Weise gebündelt. Auf Freiberger Seite werden die Arbeiten durch Prof. Dirk C. Meyer geleitet. Forschungsschwerpunkte des dreijährigen Projektes sind Materialien für die Niedrigtemperatur-Natrium-Schwefelbatterie und die dazugehörigen Fertigungstechnologien sowie der Entwurf, der prototypische Aufbau und die experimentelle Erprobung von Natrium-Schwefel-Speichermodulen für hochkapazitive Batterie-Speicherwerke.

Mit dem erfolgreichen Abschluss des Projektes entsteht ein neuer stationärer Batterietyp zur Speicherung elektrischer Energie. Durch sein großes spezifisches Speichervermögen, seine hohe Sicherheit und Lebensdauer sowie vertretbaren Kosten wird er die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende in Deutschland verbessern helfen. Gleichzeitig kommen ausreichend vorhandene Rohstoffe wie Natrium und Schwefel zum Einsatz.

Gemeinsam mit dem Institut für Werkstoffwissenschaft (Prof. David Rafaja) arbeitet die Arbeitsgruppe um Prof. Dirk Meyer an der Multiskalen-Betrachtung für dedizierte ressourceneffiziente Materialkonzepte. Dies betrifft die Aufklärung der festkörperphysikalischen und -chemischen Prozesse, der kristallographischen Strukturen und Phasen sowie der auftretenden Defekte und deren Bildungsmechanismen.

Bisher wurde eine gemeinsame Veröffentlichung ausgearbeitet und das Manuskript bei einer internationalen Fachzeitschrift eingereicht. Weiterhin erfolgte der Aufbau einer *In-situ*-/*In-operandi*-Charakterisierungseinheit für die röntgenographische Phasenanalyse.



ESF-Nachwuchsgruppe PyroConvert

Die ESF-Nachwuchsgruppe PyroConvert ist ein interdisziplinäres Team junger Nachwuchsforscher unter der Leitung von Prof. Dirk C. Meyer. So ist ein Teil am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Prof. Bernd Meyer), der andere am Institut für Experimentelle Physik (Prof. Dirk Meyer) angesiedelt. Innerhalb von PyroConvert werden Konzepte für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme für Energie- und Stoffwandlungsprozesse erarbeitet. Gleichzeitig qualifizieren sich die jungen Nachwuchswissenschaftler so insbesondere für die modernen Disziplinen Elektrochemie, Energie- und Stoffwandler bzw. Energiespeicherung und Materialanalytik.

Nach Schätzungen verschiedener Energieagenturen und Institutionen gehen heute weltweit mehr als 50 % des für die technische Nutzung gewandelten Energieaufkommens in Form von Abwärme verloren. Diese Abwärme – insbesondere in Form von in herkömmlichen Anlagen nicht mehr arbeitsfähiger Niedertemperaturabwärme – nutzbar zu machen ist Ziel der Nachwuchsgruppe. Einen Kern des Vorhabens bildet die wissenschaftliche Untersuchung, Entwicklung und technische Erprobung innovativer Ansätze auf Grundlage der Umwandlung von Niedertemperaturabwärme (ungenutzter thermischer Energie) in Wasserstoff (variabel einsetzbare chemische Energie) durch Anwendung neuartiger pyroelektrischer Funktionsmaterialien. Diese pyroelektrischen Materialien reagieren auf Temperaturänderungen mit der Bereitstellung von elektrischen Ladungen auf der Oberfläche bzw. dem Ausbilden starker elektrischer Felder und Spannungen bis in den Megavolt-Bereich und sind daher prädestiniert für Anwendungen, die eine Umwandlung thermischer Energie in andere Energieformen, wie elektrische oder chemische fördern. Zusätzlich werden maßgebliche Fortschritte im Bereich antibakterieller und eisabweisender Beschichtungen erwartet. Da viele Pyroelektrika mit hohen pyroelektrischen Koeffizienten oxidische Dielektrika sind, ist eine Herstellung mehrerer Vertreter dieser Materialklasse per Atomlagenabscheidung sowie anschließender Modifizierung geplant, um die für die pyrokatalytische Wirksamkeit mit hoher Effizienz entscheidenden großen Oberflächen zu realisieren.



PYROCONVERT

Pyroelektrische Funktionsmaterialien
für Energie- und Stoffwandlung

Zusätzlich sollen auf anderem Wege hergestellte pyroelektrische Schichten und Folien durch eine Oberflächenmodifikation für Anwendungen, bei denen ein Kontakt zu flüssigen oder gasförmigen Materialien beabsichtigt ist, konditioniert werden. Im Bereich der Materialsynthese und diesbezüglicher Anwendungen sind das Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien, das Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg und die GMBU Dresden-Rossendorf am Projekt beteiligt.

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine Plattform (www.pyroconvert.tu-freiberg.de) initiiert, welche die Kompetenzen zu pyroelektrischen Materialien in der Region Freiberg bündeln soll. Ferner erfolgte ein Infrastrukturaufbau, welcher die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet: von einer Materialdatenbank, über verschiedene Methoden der Materialsynthese, der Materialcharakterisierung und -testung bis hin zu verschiedenen Demonstratoren. Bisher wurden zwei Patente angemeldet. Weiterhin wurden sechs wissenschaftliche Artikel zur Veröffentlichung eingereicht, wovon drei Artikel bisher erschienen sind. Die Arbeiten, sowie der Stand einzelner im Projekt bearbeiteter Themen, wurden in sechs Beiträgen auf verschiedenen Konferenzen/Tagungen vorgestellt. Insgesamt wurde eine Materialdatenbank mit mehr als 3000 Einträgen generiert, welche die systematische Betrachtung der Pyroelektrika erlaubt.



Krüger-Forschungskolleg: Freiberger Biohydrometallurgisches Zentrum (BHMZ)

Für Industrieländer ist eine sichere und ausreichende Versorgung mit Metallen von entscheidender Bedeutung. Dies gilt auch für „strategische Elemente“, welche für Hochtechnologieprodukte unverzichtbar sind, da sie nur in begrenztem Maße ersetzt werden können. Sie werden zur Herstellung von elektrischen oder elektronischen Bauteilen sowie für Glasfaseroptik, für Laser-Technologie und für viele weitere hochtechnisierte Produkte verwendet.

Während sich einerseits der Bedarf an strategischen Elementen erhöht hat und auch zukünftig weiter steigen wird, ist andererseits die Realisierung einer ausreichenden Versorgung dadurch erschwert, dass die Erze aus immer größeren Tiefen bergmännisch abbaut werden müssen. Ferner müssen für die Metallextraktion auch Erze mit geringen Metallkonzentrationen und komplexer Struktur verwendet werden. Dabei wird angestrebt, die Bergbauaktivität so nachhaltig wie möglich zu gestalten und hohe ökologische Standards zu erfüllen. Dazu gehört unter anderem, die Schadstoffbelastung für Wässer, Böden oder Luft zu minimieren, aber auch den Energieverbrauch durch Bergbau so gering wie möglich zu halten.

Um diesen globalen und nationalen Herausforderungen gerecht zu werden, spielen hydrometallurgische Verfahren und insbesondere biohydrometallurgische Verfahren eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund hat die TU Bergakademie Freiberg mit Finanzierung durch die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung das Freiberger Biohydrometallurgische Zentrum (BHMZ) als Krüger-Forschungskolleg gegründet. Ziel ist es die interdisziplinäre Forschung entlang der gesamten (bio-)hydrometallurgischen Prozesskette zu fördern und einen regen Austausch zwischen den Forschern zu ermöglichen. Die abgedeckte Prozesskette umfasst Verfahren, das jeweilige Metall aus dem jeweiligen Ausgangsmaterial (Lagerstätte, Halde, Recycling-Material) in wässrige Lösung zu bringen, sowie verschiedene Herangehensweisen, um reine Metalle oder Metalle enthaltende Materialien aus der Lösung zu gewinnen.

Die Doktoranden des Krüger-Forschungskollegs legen den Schwerpunkt ihrer Untersuchungen auf die beiden Elemente Indium und Germanium, welche von strategischer Bedeutung sind und im 19. Jahrhundert von Wissenschaftlern der Bergakademie entdeckt wurden. Jedoch sollen die Erfahrungen, welche



durch das Krüger-Forschungskolleg am Beispiel von Germanium und Indium gewonnen werden, und die verfügbaren Geräte in zusätzlichen Projekten auch zur Gewinnung anderer Metalle genutzt werden.

Zur Förderung der interdisziplinären Forschung werden spezielle Kurse für die Mitglieder des BHMZ angeboten, in denen Kenntnisse entlang der Prozesskette erworben werden, die nicht dem eigenen Fachgebiet entsprechen. Zusätzlich haben die Doktoranden die Möglichkeit, an Kursen zu Soft-Skills, Betriebswirtschaftslehre etc. teilzunehmen, welche von der Graduierten- und Forschungsakademie (GraFA) koordiniert werden.

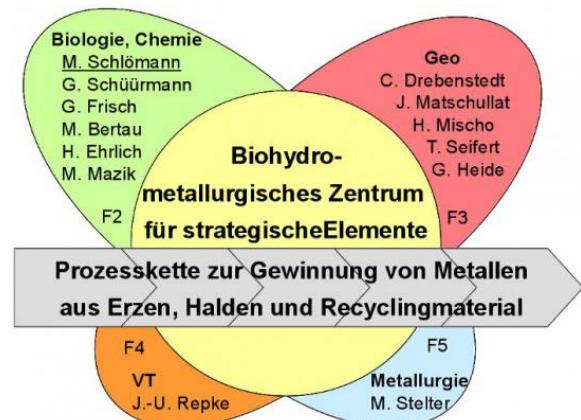
Das BHMZ hat sich zum Ziel gesetzt, die Forschung zur umweltverträglichen Gewinnung von strategischen Metallen zu intensivieren und hierdurch eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung zu fördern.

Der Kern des Krüger-Forschungskollegs wird von 13 Professoren durch deren Teilprojekte gebildet. Die Teilprojekte beschäftigen sich mit der Geologie und Metallogenie von Indium- und Germanium-Lagerstätten sowie der Hydrometallurgie von Indium und Germanium, der selektiven Gewinnung von Spuren elementen aus Tailings/Halden, der Laugungskinetik von Blei-Zink-Erzen und Erzmineralen, der Metallgewinnung aus komplexen polymetallischen Systemen und der Komplexbildung, Hydrolyse und Fällung von Indium und Germanium unter den Bedingungen der Biolaugung. Dazu werden auch neue In-/Ge-Liganden computerchemisch analysiert, synthetisiert und deren spezielle Eignung untersucht. Ferner wird an einem membranbasierten Trenn- und Anreicherungsverfahren zur selektiven Metallgewinnung aus Laugungslösungen sowie an der komplexen geochemischen Analytik gearbeitet.

Herzstück des Projektes ist das Design sowie die Einrichtung und Durchführung eines großangelegten *In-situ*-Versuches zur mikrobiellen Laugung von Spurelementen und Mikromineralen im Sphalerit (Zinkblende) des Forschungsbergwerkes „Reiche Zeche“.

Neben den genannten Lehrstühlen leisten weitere assoziierte Gruppen Beiträge zu den Lehraktivitäten im Rahmen des Forschungskollegs oder sind an gemeinsamen Projekten beteiligt. Das BHMZ wird zusätzlich von einem Beirat unterstützt, bestehend aus Unternehmensvertretern, Vertretern des Helmholtz-Institutes Freiberg, des Sächsischen Oberbergamtes, der Industrie- und Handelskammer Chemnitz sowie Professoren anderer Universitäten.

Das Institut für Experimentelle Physik beteiligt sich durch Prof. Hermann Ehrlich mit einem Teilprojekt am BHMZ. Ziel ist die Entwicklung eines biomimetischen Verfahrens zur Gewinnung von neuen Germaniumhaltigen Biokompositen. Dazu wird unter anderem untersucht, mit welchem Mechanismus Schwämme und Kieselalgen Germaniumphasen umwandeln.



Veranstaltungen

21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie

Die 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie (DGK) fand im Jahr 2013 vom 19. bis zum 22. März erstmalig in der Universitäts- und Bergbaustadt Freiberg auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg statt. Organisiert wurde diese Tagung vom Institut für Experimentelle Physik.

Der Tagungspräsident und Direktor des Instituts für Experimentelle Physik, Prof. Dirk C. Meyer, begrüßte über 380 nationale und internationale Mitglieder der DGK im noch verschneiten Freiberg.

Erstmals stand die Jahrestagung unter einem Motto: „Von der Symmetrie zur Funktion“. Dementsprechend waren die einzelnen Symposien mit 121 Vorträgen und 145 Postern im Sinne eines Themenbogens angeordnet: von den Grundlagen der Kristallographie bis hin zur Anwendung.

Während die Grundlagenthemen unter aktiver Beteiligung der verschiedenen Arbeitskreise arrangiert wurden, rundete das Symposium „Materials for Electronics: Energy and Data Storage through the Eyes of Crystallographers“ und das „Industriesymposium“ das Tagungsgeschehen gemäß des Mottos eindrucksvoll ab. Das Tagungsprogramm gab damit in ganz ausgezeichneter Weise die Bedeutung der Kristallographie als Querschnittswissenschaft wieder.

Thematisch widmete sich die 21. Jahrestagung damit umfassend der gesamten Wertschöpfungskette von den Naturmaterialien bis hin zur industriellen Produktion. Genau dieser Ansatz ist es auch, der die geschichtsträchtige TU Bergakademie Freiberg prägt.

Die über die deutschen Grenzen hinaus als älteste Montanuniversität der Welt bekannte Technische Universität – im Jahr 2015 wird sie ihr 250-jähriges Bestehen feiern – zeichnet sich durch ein Studium und die Forschung entlang einer in sich geschlossenen Wertschöpfungskette aus, die, ausgehend von der Erkundung von Rohstoffen über deren Gewinnung und Aufbereitung, der Materialentwicklung, dem



technologischen Einsatz für Produkte aller Art und der Energiewandlung bis hin zum Recycling, jede Wertschöpfungsstufe betrachtet und aufgreift. Gerade die Kristallographie ist hier an vielen Schnittstellen zu finden und daher an der Bergakademie eine sehr lebensdige Wissenschaftsdisziplin.

Die kleine und geschichtsträchtige Stadt Freiberg bot für die nunmehr 21. Jahrestagung einen ganz außergewöhnlichen Rahmen. Zum einen gilt Freiberg als das historische Zentrum des Bergbaus in der Erzgebirgsregion. Zum anderen ist Freiberg auch führender Standort modernster Halbleitertechnologien und vieler namhafter, darauf spezialisierter Unternehmen.

Damit verbindet Freiberg auf ganz besondere Weise, gemäß dem Motto der Tagung, die bergbauliche Tradition und die Materialforschung mit der modernen Industrie.

Während der vergangenen Jahrestagung konnten die Teilnehmer gleich mehrere Orte des Campus kennenlernen: Sei es das Audimax, in dem die Plenarvorträge mit den durchweg thematisch sehr ansprechenden Beiträgen stattfanden, oder die Neue Mensa, die den Raum für den Dialog zwischen den Mitgliedern und Gästen, für die Postersessions und die Industrieausstellung sowie die vielfältigen Symposien bot.

An dieser Stelle ist auch die Alte Mensa im historischen Freiberger Stadtzentrum zu nennen, die einen wunderbaren Rahmen für ein Highlight der Jahrestagung, den Vortrag des Nobelpreisträgers für Chemie des Jahres 2011, Professor Dan Shechtman (Technion Haifa, Israel), bot. Über 500 Hörer verfolgten fasziniert, und aufgrund der hervorragenden Arbeit zweier Simultanübersetzer, ohne Verständnisschwierigkeiten den spannenden Vortrag mit dem Titel „*Quasi-Periodic Materials – Crystal Redefined*“.

Auf gleichwohl interessante wie auch amüsante Art nahm Professor Shechtman sowohl die Mitglieder der DGK als auch zahlreiche Studierende und Mitarbeiter der Bergakademie sowie Einwohner Freibergs mit auf seine Reise, die mit seiner spektakulären Entdeckung der Quasikristalle Anfang der 1980er Jahre begann und schließlich mit der Verleihung des Nobelpreises von fulminantem Erfolg gekrönt wurde.

Neben den gehaltvollen Vorträgen und Symposien verfolgte die diesjährige Konferenz auch ein weiteres wichtiges Ziel: die Unterstützung der Nachwuchswissenschaftler bei der Bildung eines neuen Arbeitskreises. Unter der Moderation von Dr. Barbara Abendroth wurde ein Treffen initiiert, zu dem alle jungen Kristallographen eingeladen waren. Frau Aline Bergert, die Leiterin der Kommunikationsstelle E-Learning an der TU Bergakademie Freiberg, zeigte den jungen Nachwuchswissenschaftlern auf, wie ein internetbasiertes und eigens für einen einschlägigen neuen Arbeitskreis ins Leben gerufenes soziales Netzwerk etabliert werden kann. Langfristig soll so eine besonders informative und interaktive Plattform geschaffen werden, die den Dialog der jungen Kristallographen aller Fachrichtungen anregen und fördern sowie die Netzwerkbildung erleichtern wird.

Als ein weiterer feierlicher Punkt erfolgte auf dem traditionellen Ehrenabend die Vergabe der wichtigen Preise der DGK. Für das wissenschaftliche Lebenswerk auf dem Gebiet der Kristallographie wurde die Carl-Herrmann-Medaille an Herrn Prof. Dr. Emil Makovicky, Universität Kopenhagen, Dänemark, vergeben. Die Will-Kleber-Gedenkmünze für hervorragende wissenschaftliche Beiträge auf ausgewählten Gebieten der Kristallographie ging an Herrn Prof. Dr. Helmut Klapper von der Universität

Bonn. Den angesehenen Max-von-Laue-Preis erhielt in diesem Jahr Herr Dr. Lkhamsuren Bayarjargal vom Institut für Geowissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt/Main. Der Abend wurde durch einen Vortrag vom letztjährigen Max-von-Laue-Preisträger, Herrn Dr. Tilmann Leisegang, TU Bergakademie Freiberg, beschlossen.

Neben dem traditionellen Ehrenabend, für den das Collegicum Musicum der Bergakademie für eine musikalische Untermalung gewonnen werden konnte, wurden verschiedene Freizeitaktivitäten geboten, die eine überwiegend positive Resonanz erzeugten. Von der Einfahrt in das Lehr- und Besucherbergwerk „Reiche Zeche“ über einen Stadtrundgang bis hin zur Besichtigung eines der zahlreichen Industrieunternehmen wurde für jeden die passende Ergänzung des Programms zur Verfügung gestellt.

Schließlich konnten alle Beteiligten am Vorabend des letzten Konferenztages einen schönen Gesellschaftsabend im Konzert- und Ballhaus Tivoli erleben. Dieser Abend wartete nicht nur mit einem vorzüglichen Menü auf; durch einen Auftritt der Freiberger Bergmänner in der stilechten traditionellen Arbeitskleidung des Bergbaus wurde auch eine weitere Facette der Freiberger Kultur sichtbar. Schließlich unternahm das Duo „con passione“ bestehend aus Anja Bachmann und Sabine Klinkert eine „Musikalische Weltreise“ und ließ so den Abend angemessen ausklingen.

Eine Sonderausgabe des Journals „*Crystal Research and Technology*“ wird an diese Tagung erinnern. Die Plenarvortragenden wurden herzlich eingeladen, einen Beitrag für diese Ausgabe zur Verfügung zu stellen. Ebenso hatten die Chairmen der Sessions sowie die Sprecher der Arbeitskreise die Möglichkeit, besonders hochwertige Beiträge für den Sonderband, bei dem Frau Dr. Barbara Abendroth und Herr Prof. Dirk C. Meyer als Gastherausgeber agieren werden, vorzuschlagen. Diese Sammlung soll umfassend das Motto „Von der Symmetrie zur Funktion“ widerspiegeln.

Bilder auf der nächsten Seite: Eindrücke von der Tagung und dem Gesellschaftsabend, © Conventus.



1. Internationale Freiberger Tagung zu Energiespeichermaterialien (ESTORM)



Das Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg lud gemeinsam mit dem Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien Freiberg und dem Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg am 3. und 4. Juni 2013 zur 1. Internationalen Freiberger Tagung zu Energiespeichermaterialien (*1st International Freiberg Conference on Energy Storage Materials – ESTORM*) ein. Das Anliegen dieses ersten Treffens in Freiberg war es, zu zeigen, dass die Speicherung von elektrischer Energie aus den erneuerbaren Wandlungsverfahren zu den wichtigsten Herausforderungen der nahen Zukunft zählt. Derzeit konzentriert sich die Forschung stark auf die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien, um diese Nachfrage zu erfüllen. Dennoch gibt es zahlreiche weitere Batteriekonzepte, die möglicherweise besser für zukünftige Anwendungen in der Breite geeignet sind. So hatte es sich das Organisationsteam zum Ziel gesetzt, allen Teilnehmern, aber vor allem den wirtschaftlichen Branchen, eine neue und inspirierende Plattform zu schaffen.

Hierfür konnten renommierte Experten aus der ganzen Welt als Vortragende gewonnen werden. Diese berichteten in der zweitägigen Veranstaltung zum aktuellen Stand der elektrochemischen Energiespeicher und gaben damit sowohl einen wissenschaftlichen als auch wirtschaftlichen Überblick über die in den Komponenten der elektrochemischen Zelle eingesetzten Materialien und deren Fertigungstechnologien.



Diese *High-Level-Einführung* war eine Premiere und ausgezeichnete Gelegenheit bestehende sowie neue, zukunftsträchtige Konzepte für die elektrochemische Energiespeicherung zu diskutieren und gegebenenfalls Anpassungen bestehender Technologien vorzunehmen. Den verschiedenen teilnehmenden Industriebranchen konnte aufgezeigt werden, wie sie ihre bereits etablierten Kompetenzen in den Bereich der elektrochemischen Energiespeicher einbringen und nutzenbringend umsetzen können.

Als Universitätsstadt und innovativer Wirtschaftsstandort bot Freiberg für diese Konferenz einen überaus geeigneten Rahmen. So verfügt die TU Bergakademie im Materialbereich über eine in ihrer Geschlossenheit einzigartige Innovationskette ausgehend von den Wissenschaftsbereichen der Mineralogie und Kristallographie über die Festkörperphysik und Chemie bis hin zur Werkstoffwissenschaft und -technologie. Zum Thema der elektrochemischen Energiespeicher bildet die Ressourcenuniversität zusammen mit dem Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM Freiberg, dem Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen Freiberg und dem Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg das Zentrum eines regionalen Forschungsclusters.

Im historischen Kern der Bergbaustadt, in der Alten Mensa, trafen sich schließlich mehr als 80 Vertreter aus Industrie und Forschung. Nach der Eröffnungsrede von Herrn Dr. Tilmann Leisegang (Fraunhofer THM, Deutschland), führte zunächst Herr Christophe Pillot (Avicenne Energy, Frankreich) in das Thema der elektrochemischen Energiespeicher mit einer Marktanalyse und einem Ausblick ein. Darauffolgend erläuterte Herr Prof. Dr. Deyang Qu (University of Massachusetts, USA) generelle Grundsätze des Batterieaufbaus. Im weiteren Verlauf des Tages wurden Kathoden, Anoden, Separatoren, Elektrolyte und Superkondensatoren sowie Batterieeinhausungen umfassend hinsichtlich der eingesetzten Materialien vorgestellt. Für diese Vorträge konnten Herr Dr. Claus Daniel (Oak Ridge National Laboratory, USA),

Herr Prof. Dr. Rudolf Holze (TU Chemnitz, Deutschland), Herr Dr. Christoph Weber (Freudenberg Vliesstoffe, Deutschland), Frau Prof. Dr. Perla Balbuena (Texas A&M University, USA), Herr Vasile V. N. Obreja (National R&D Institute for Microtechnology, Rumänien) sowie Herr Dr. Matthias Herrmann (Hoppecke Advanced Battery Technology GmbH, Deutschland) als Sprecher gewonnen werden.

Den Abschluss des ersten Konferenztages bildete das „Conference Dinner“ im Festsaal des Freiberger Brauhofes. Dort eröffneten sich vielfältige Diskussionen zwischen den Teilnehmern, die eine musikalische Untermalung durch das „Trio Insolite“ fanden.

Den Schwerpunkt des zweiten Konferenztages bildeten die Technologien. Analog zum ersten Tag wurden diese im Zusammenhang mit Kathoden, Anoden, Separatoren, Elektrolyten, Superkondensatoren sowie Batterieeinhausungen vorgestellt. Die Vortragenden des zweiten Tages waren Herr Prof. Dr. Ehrenberg (KIT, Deutschland), Herr Dr. Richard Wills (University of Southampton, Großbritannien), Herr Dr. Jochen Schilm (Fraunhofer IKTS, Deutschland), Herr Dr. Markus Vogt (BASF, Deutschland), Herr Prof. Dr. Gleb Yushin (Georgia Institute of Technology, USA) und Herr Dr. Eric Maiser (VDMA, Deutschland).

Nach einer themenspezifischen Diskussionsrunde, die an das Modell des „World-Café“ angelehnt war, fand die 1. Internationale Tagung zu Energiespeichermaterialien ihren Ausklang im Rahmen einer zweisprachigen Stadtführung.

Die 1. ESTORM bildete den Auftakt für ein langfristiges, aktives und inspirierendes Netzwerk zum Thema der elektrochemischen Energiespeicher in Freiberg. Im Anschluss an diese Tagung ist ein Tagungsband im angesehenen Verlag des „American Institute of Physics“ erschienen, der die diskutierten Ergebnisse zusammenfasst: „Review on Electrochemical Storage Materials and Technology“, herausgegeben von Dirk C. Meyer und Tilmann Leisegang, AIP Conference Proceedings 1497 (2014).

Für die finanzielle Unterstützung bedanken wir uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Verbundprojektes CryPhysConcept.



12. „International Symposium on Biomineralization“ (BIOMIN2013)

Vom 27. bis zum 30. August 2013 fand in Freiberg das „International Symposium on Biomineralization“ statt, welches von der Arbeitsgruppe „Biomineralogy and Extreme Biomimetics“ organisiert wurde. Forscher und Studenten aus der ganzen Welt kommen bei diesen internationalen Symposien zusammen, um sich über die Mechanismen der Biomineralisation und neue innovative Ansätze zur Verwendung biomineralscher Prinzipien auszutauschen. Das erste Symposium dieser Reihe fand im Jahr 1970 in Mainz statt und wurde seitdem in den USA, in Japan, Holland, Monaco, Chile, China und Australien erfolgreich abgehalten. Zum zweiten Mal fand das „International Symposium on Biomineralization“ nun wieder in Deutschland statt – eine große Ehre für Freiberg.

Das über 50-köpfige Organisations- und Wissenschaftskomitee setzt sich aus hervorragenden Wissenschaftlern von Cambridge bis Tokio zusammen. Tagungspräsident war Prof. Dr. habil. Hermann Ehrlich. In Fachvorträgen und Postern von mehr als 190 Teilnehmern wurden evolutionäre Aspekte der Biomineralisation, molekulare und genetische Steuerung der Biomineralisation von den Bakterien bis zu den Wirbeltieren, Biosilifizierung und Calcifizierung, pathologische Biomineralisation sowie moderne analytische Techniken und Methoden präsentiert und diskutiert. Fünf weltweit renommierte Forscher aus Israel, USA, England und Deutschland hielten die Eröffnungsvorträge zum aktuellen Stand der Biomineralisation.



Einweihung der Bronzeplatte auf dem Schloßplatz

Die kreisrunde Gedenkplatte – entworfen vom Architekten Dr. Volker Benedix und Diplom-Formgestalter Jochen Schmieder – veranschaulicht den Atomaufbau der chemischen Elemente Indium und Germanium jeweils zur Hälfte in einem schematischen Atommodell. Die Elektronen in der Atomhülle werden dabei mit gelben und roten Granitsteinen entsprechend der Pflasterung des Schloßplatzes dargestellt. Studierende und Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik lieferten den fachlichen Beirat. Neben Architekt und Universität ermöglichten auch die Nickelhütte Aue GmbH und die Kunstguss Lauchhammer GmbH die Bronzeplatte.

Bei der Gestaltung der Bronzeplatte waren einige gestalterische und praktische Herausforderungen zu berücksichtigen. Natürlich sollten die Elektronen und deren Bahnen so angeordnet werden, dass möglichst viel physikalische und chemische Information erhalten bleibt. Zum Beispiel wurden die Bahnradien zunächst exakt berechnet, aber dann leicht angepasst, um Erkennbarkeit und Machbarkeit nicht zu gefährden. Andererseits sollte die Bronzeplatte von allen Passanten barrierefrei begehbar sein, den Wasserablauf erlauben und überhaupt herstellbar bleiben. Schließlich fiel die Entscheidung, die Elektronenbahnen als von innen nach außen abfallende Stufen zu gestalten und die „Elektronen“ als Steine in die Platte einzulassen. Durch die Aufteilung der Platte in zwei Hälften für Indium und Germanium wurde für jedes Atom nur die Hälfte der Elektronen dargestellt. Für das Indium-Atom mit 49 Elektronen musste also ein „halbes Elektron“ angefertigt und eingelassen werden.



Am Freitag, dem 22. März 2013, wurde bei starker Kälte die Bronzescheibe von zwei Meter Durchmesser in den Boden eingelassen. Dabei sagte Prof. Dirk C. Meyer, Prorektor für Strukturentwicklung der Ressourcenuniversität: „Der Prozess der Entstehung war ein schönes Gemeinschaftswerk. Von der Universität haben sich Kollegen der theoretischen und der Festkörperphysik ebenso beteiligt wie Bohrtechniker.“

In seiner Begrüßung der gut 100 Gäste freute sich Prof. Dirk C. Meyer darüber, dass die Bronzeplatte „auf dem Schloßplatz als zentralem Ort der Stadt und als Teil des Wissenschaftskorridors zwischen Universitätshauptgebäude und Campus der TU Bergakademie nun ihren angemessenen Platz findet.“ Holger Reuter, Bürgermeister für Stadtentwicklung und Bauwesen, ergänzte, dass „nun alle Freiberger ihren Gästen erklären können, wie die Atomstruktur der in Freiberg entdeckten Elemente aussieht.“ Zudem sei die Bronzeplatte Ausdruck des guten Zusammenwirkens zwischen Stadt und Universität.



Erweiterung des Lehr- und Forschungsangebots durch Anbindung an das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY und den European XFEL in Hamburg

Auf einen erfolgreichen Antrag des seinerzeitigen Proektors für Bildung Prof. Dr. Dirk C. Meyer (heute Proktor für Strukturentwicklung) der TU Bergakademie Freiberg hin stehen seit dem Jahr 2012 jährlich Mittel für verschiedene Lehr- und Praktikumsangebote zur Verfügung. Die Programme werden über die „Dritte Säule des Hochschulpaktes“ im Rahmen des Projektes MESIOR durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und bieten u. a. durch die Anbindung an das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) der Helmholtz-Gemeinschaft und den europäischen Röntgen-Freie-Elektronen-Laser (European XFEL) die Möglichkeit, aktuelle Forschung an Großgeräten schon innerhalb der akademischen Ausbildung aktiv mitzuerleben und selbst durchzuführen.

Auch in diesem Jahr konnten Studierende der Bergakademie wieder neue moderne Forschungsmethoden am DESY in Hamburg kennenlernen. Insgesamt 25 Studierende verschiedener Fachrichtungen, haben

diese Möglichkeit wahrgenommen (siehe Abb. 1). Die neu entstandenen Lehrprogramme umfassen regelmäßige Exkursionen zum DESY, bei denen erfahrene Wissenschaftler vor Ort die Studierenden durch alle Bereiche des Forschungszentrums führen und anhand konkreter Experimente die wissenschaftlichen Fragestellungen erläutern.

Das Helmholtz-Zentrum DESY ist gegenwärtig vor allem in der Forschung mit Photonen eines der führenden Zentren weltweit. Mit den DESY-Großgeräten erkunden Forscher den Mikrokosmos in seiner ganzen Vielfalt – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen über das Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe bis hin zu jenen lebenswichtigen Prozessen, die zwischen Biomolekülen ablaufen. Die dafür erforderlichen Beschleuniger wie auch die Nachweisinstrumente, die DESY entwickelt und baut, sind einzigartige Werkzeuge für die Forschung: Sie erzeugen das stärkste Röntgenlicht der Welt. Insbesondere durch das im Jahr 2009 in Betrieb gegangene Synchrotron Petra III wird Forschern aus vielen Bereichen die derzeit brillanteste Röntgenstrahlung weltweit bereitgestellt.

Das diesjährige Programm der Freiberger umfasste neben einer allgemeinen Führung durch das DESY-Gelände speziell auch die Demonstration von Experimenten am Linearbeschleuniger Flash (Dipl.-Nat. T. Golz), an den Speicherringen Petra III (Dr. D. Novikov) und Doris III (Dipl.-Phys. C. Richter) (siehe Abb. 2). Des Weiteren vermittelte der seit dem Jahr 2013 nach Freiberg berufene Professor Dr. S. Molodtsov, wissenschaftlicher Direktor des XFEL-Projektes, Einblicke in zukünftige Forschung an dem im Bau befindlichen European XFEL. Abgerundet wurde die Exkursion mit einer Führung durch die Hamburger Airbus-Werke, die den Studierenden einen detaillierten Überblick über die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen bei der Fertigung von Flugzeugen, insbesondere des Modells A380, gab.



Abbildung 1: Freiberger Studenten bei der Führung zum aktuell im Bau befindlichen Röntgen-Freie-Elektronen-Laser European XFEL durch Herrn Dr. Bernd Ebeling während der DESY-Exkursion im März 2014.

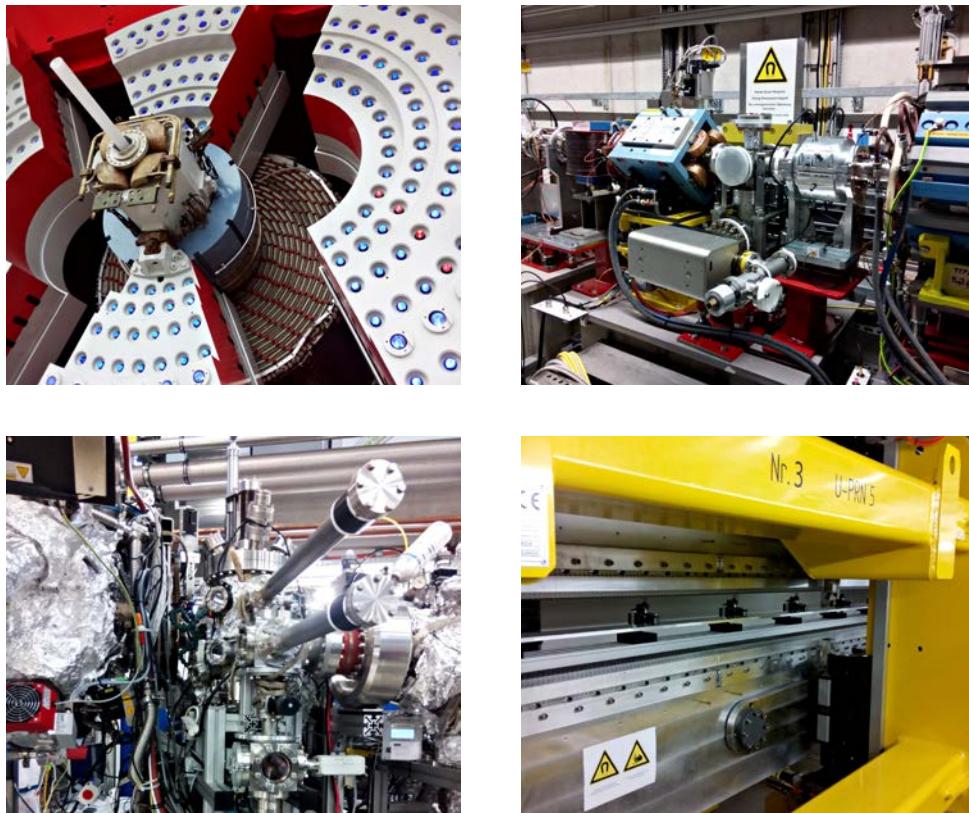


Abbildung 2: Verschiedene Ansichten der Beschleuniger und Nachweisinstrumente, die während des Programms gezeigt und vorgeführt wurden.

Die Initiative neuer Lehrprogramme im Rahmen des Projekts „Dritte Säule des Hochschulpaktes“ umfasst eine an Petra III ab dem Jahr 2015 vorgesehene Messstation, welche die Umsetzung zukünftiger Lehrvermittlung am DESY stark fördern wird. Die für die Lehre im akademischen Bereich maßgeschneiderte „Educational Beamline“ wird derzeit durch den Wissenschaftler Dr. D. Novikov geplant und kann in Zukunft auch größeren Gruppen von Studierenden die Möglichkeit der akademischen Ausbildung in modernen Röntgenmethoden bieten.

Im Aufbau befindet sich dafür u. a. auch ein eigenständiges Synchrotron-Praktikum der Bergakademie, das in das Curriculum verschiedener Masterstudienfächer integriert werden soll. Es beinhaltet eine Reihe von Versuchen, insbesondere die Röntgenfeinstrukturauflklärung (*X-Ray Absorption Fine Structure – XAFS*) und die resonante Röntgenstreuung (*Diffraction Anomalous Fine Structure – DAES*). Bei diesen modernen Methoden der Röntgenspektroskopie werden aus der energieabhängigen Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung an elementspezifischen Energien

des Probenmaterials Parameter der unmittelbaren lokalen Umgebung der resonant angeregten Atome in einzigartiger Weise gewonnen.

Unterstützt wird diese Planung durch den Freiberger Doktoranden Carsten Richter, der am DESY im Rahmen einer Abordnung durch die Bergakademie u. a. an der Projektierung einer „Chemical Crystallography Beamline“ arbeitet.

Im Rahmen eines vor kurzem unterzeichneten Kooperationsvertrages nutzen z. B. Freiberger Studierende und Promovierende, wie Frau Dipl.-Math. Melanie Nentwich und Herr Dipl.-Nat. Torsten Golz, die Einrichtungen des DESY bereits für Messungen hinsichtlich ihrer Doktor-, Diplom-, Master-, Bachelor- bzw. Studienarbeit, oder führen zur Bereicherung ihres Studiums verschiedene individuelle Praktika in Arbeitsgruppen vor Ort durch.

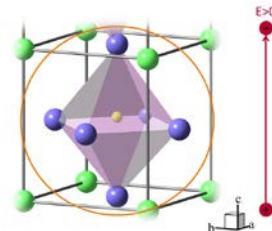
Das Programm wird auch im nächsten Jahr fortgesetzt.

Publikationen und Lehre

Publikationen

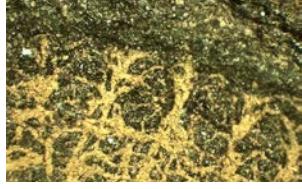
Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- D. C. Meyer, C. Baldauf: **21st Annual Conference of the German Crystallographic Society**, Powder Diffraction 28 (2013) 242–243.
- B. Abendroth, T. Moebus, S. Rentrop, R. Strohmeyer, M. Vinnichenko, T. Weling, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Atomic layer deposition of TiO₂ from tetrakis(dimethylamino)titanium and H₂O**, Thin Solid Films 545 (2013) 176–182.
- H. Stöcker, M. Rühl, A. Heinrich, E. Mehner, D. C. Meyer: **Generation of hard X-ray radiation using the triboelectric effect by peeling adhesive tape**, Journal of Electrostatics 71 (2013) 905–909.
- A. A. Levin, S. K. Filatov, P. Paufler, R. S. Bubnova, M. G. Krzhizhanovskaya, D. C. Meyer: **Temperature-dependent evolution of RbBSi₂O₆ glass into crystalline Rb-boroleucite according to X-ray diffraction data**, Zeitschrift für Kristallographie 228 (2013) 259–270.
- A. Poklad, M. Motylenko, V. Klemm, G. Schreiber, S. Martin, S. Decker, B. Abendroth, M. Haverkamp, D. Rafaja: **Interface phenomena responsible for bonding between TRIP steel and partially stabilised zirconia as revealed by TEM**, Advanced Engineering Materials 15 (2013) 627–637.
- J. Hanzig, M. Zschornak, F. Hanzig, E. Mehner, H. Stöcker, B. Abendroth, C. Röder, A. Talkenberger, G. Schreiber, D. Rafaja, S. Gemming, D. C. Meyer: **Migration-induced field-stabilized polar phase in strontium titanate single crystals at room temperature**, Physical Review B 88 (2013) 024104.



Biomineralogie und Extreme Biomimetik

- M. Wysokowski, M. Motylenko, H. Stöcker, V. V. Bazhenov, E. Langer, A. Dobrowolska, K. Czacyk, R. Galli, A. L. Stelling, T. Behm, L. Klapiszewski, D. Ambrozewicz, M. Nowacka, S. L. Molodtsov, B. Abendroth, D. C. Meyer, K. J. Kurzydlowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **An extreme biomimetic approach: Hydrothermal synthesis of β-chitin/ZnO nanostructured composites**, Journal of Materials Chemistry B 1 (2013) 6469–6476.
- H. Ehrlich, P. Simon, M. Motylenko, M. Wysokowski, V. V. Bazhenov, R. Galli, A. L. Stelling, D. Stawski, M. Ilan, H. Stöcker, B. Abendroth, R. Born, T. Jesionowski, K. J. Kurzydlowski, D. C. Meyer: **Extreme Biomimetics: Formation of Zirconium Dioxide Nanophase Using Chitinous Scaffolds under Hydrothermal Conditions**, Journal of Materials Chemistry B 1 (2013) 5092–5099.
- M. Wysokowski, V. V. Bazhenov, M. V. Tsurkan, R. Galli, A. L. Stelling, H. Stöcker, S. Kaiser, E. Niederschlag, G. Gärtner, T. Behm, M. Ilan, A. Y. Petrenko, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Isolation and Identification of chitin in three-dimensional skeleton of *Aplysina fistularis* marine sponge**, Journal of Biological Macromolecules 62 (2013) 94–100.

- H. Ehrlich, J. K. Rigby, J. Botting, M. Tsurkan, C. Werner, P. Schwille, Z. Petrasek, A. Pisera, P. Simon, V. Sivkov, D. Vyalikh, S. Molodtsov, D. Kurek, M. Kammer, S. Hunoldt, R. Born, D. Stawski, A. Steinhof, V. Bazhenov, T. Geisler: **Discovery of 505-million-year old chitin in the basal demosponge *Vauxia gracilenta***, Nature Scientific Reports 3 (2013) 3497. 
- M. Wysokowski, T. Behm, R. Born, V. V. Bazhenov, H. Meißner, G. Richter, K. Szwarc-Rzepka, A. Makarova, D. Vyalikh, P. Schupp, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Preparation of chitin-silica composites by in vitro silicification of two-dimensional *Ianthella basta* demosponge chitinous scaffolds under modified Stöber conditions**, Materials Science and Engineering C 33 (2013) 3935–3941.
- M. Wysokowski, A. Piasecki, V. V. Bazhenov, D. Paukszta, R. Born, P. Schupp, I. Petrenko, T. Jesionowski: **Poriferan Chitin as the Scaffold for Nanosilica Deposition under Hydrothermal Synthesis Conditions**, Journal of Chitin and Chitosan Science 1 (2013) 26–33.
- L. Chernogor, N. Denikina, I. Kondratov, I. Solovarov, I. Khanaev, S. Belikov, H. Ehrlich: **Isolation and identification of microalgal symbiont from the primmorphs of the endemic freshwater sponge *Lubomirskia baikalensis* (Lubomirskiidae, Porifera)**, European Journal of Phycology 48 (2013) 497–508.
- Ł. Kłapiszewski, M. Wysokowski, I. Majchrzak, T. Szatkowski, M. Nowacka, K. Siwinska-Stefanska, K. Szwarc-Rzepka, P. Bartczak, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Preparation and characterization of multifunctional chitin/lignin materials**, Journal of Nanomaterials, special issue “Nanostructured Surfaces, Coatings, and Films: Fabrication, Characterization, and Application” (2013) 425726.
- M. Wysokowski, M. Motylenko, V. V. Bazhenov, D. Stawski, I. Petrenko, A. Ehrlich, T. Behm, Z. Kljajic, A. L. Stelling, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Poriferan Chitin as a Template for Hydrothermal Zirconia Deposition**, Frontiers of Materials Science 7 (2013) 248–260.
- D. Schleuter, A. Günther, S. Paasch, H. Ehrlich, Z. Kljajic, T. Hanke, G. Bernhard, E. Brunner: **Chitin-based renewable materials from marine sponges for uranium adsorption**, Carbohydrate Polymers 92 (2013) 712–718.
- K. Kunze, H. Niemann, S. Ueberlein, R. Schulze, H. Ehrlich, E. Brunner, P. Proksch, K.-H. van Pee: **Brominated Skeletal Components of the Marine Demosponges, *Aplysina cavernicola* and *Ianthella basta*: Analytical and Biochemical Investigations**, Marine Drugs 11 (2013) 1271–1287.
- H. Ehrlich, O. Kaluzhnaya, E. Brunner, M. V. Tsurkan, A. Ereskovsky, M. Ilan, K. R. Tabachnick, V. V. Bazhenov, S. Paasch, M. Kammer, R. Born, A. Stelling, R. Galli, S. Belikov, O. V. Petrova, V. Sivkov, D. Vyalikh, S. Hunoldt, G. Wörheide: **Identification and first insights into the structure and biosynthesis of chitin from the freshwater sponge *Spongilla lacustris***, Journal of Structural Biology 183 (2013) 474–483. 
- H. Ehrlich, O. V. Kaluzhnaya, M. V. Tsurkan, A. Ereskovsky, K. R. Tabachnick, M. Ilan, A. Stelling, R. Galli, O. V. Petrova, S. V. Nekipelov, V. N. Sivkov, D. Vyalikh, R. Born, T. Behm, A. Ehrlich, L. I. Chernogor, S. Belikov, D. Janussen, V. V. Bazhenov, G. Wörheide: **First report on chitinous holdfast in sponges (Porifera)**, Proceedings of the Royal Society B 280 (2013) 20130339.

- H. Ehrlich: **Biomimetic potential of chitin-based composite biomaterials of poriferan origin**, In: Biomimetic biomaterials: Structure and applications. (Ed. Andrew J. Ruys). Series in Biomaterials: Number 57. Woodhead Publishing, S. 47–67 (2013).
- H. C. W. Skinner, H. Ehrlich: **Biomineralization**, In: Treatise on Geochemistry. Vol. 10: Biogeochemistry, 2nd Edition (Ed. K. K. Turekian, H. D. Holland). Elsevier Science, S. 105–162 (2013).

Photovoltaik

- R. Zierer, Th. Kaden, S. Würzner, H.-J. Möller: **The distribution of interstitial iron at dislocation clusters at elevated temperature**, Energy Procedia 38 (2013) 459.
- R. Buchwald, K. Fröhlich, S. Würzner, T. Lehmann, K. Sunder, H.-J. Möller: **Analysis of the sub-surface damage of mc- and cz-Si wafers sawn with diamond-plated wire**, Energy Procedia 38 (2013) 901.
- D. Meißner, St. Schönfelder, B. Hurka, J. Zeh, K. Sunder, R. Köpge, Th. Wagner, A. Grün, H.-J. Hagel, H.-J. Möller, H. Schwabe, O. Anspach: **Loss of wire tension in the wire web during the slurry based multi wire sawing process**, Energy Procedia 38 (2013) 1002.
- R. Buchwald, K. Fröhlich, S. Würzner, T. Lehmann, K. Sunder, H.-J. Möller: **Analysis of the sub-surface damage of mc- and cz-Si wafers sawn with diamond-plated wire**, Proc. 28th EU PVSEC (2013) 1502.
- H.-J. Möller, S. Retsch, R. Rietzschel: **On the origin of wafer saw marks in slurry based multi-wire sawing**, Proc. 28th EU PVSEC (2013) 927.
- R. Zierer, H.-J. Möller: **Impact of low temperature annealing on the lifetime in the edge regions of multicrystalline silicon ingots**, Proc. 28th EU PVSEC (2013) 1460.
- D. Stoyan, C. Funke, S. Rasche: **Back to and beyond Weibull – the hazard function approach**, Computational Materials Science 68 (2013) 181–188.
- E. Schmid, C. Funke, T. Behm, O. Pätzold, H. Berek, M. Stelter: **Investigation of dislocation structures in ribbon- and ingot-grown multicrystalline silicon**, Journal of Crystal Growth 382 (2013) 41–46.
- T. Behm, C. Funke, H.-J. Möller: **Surface orientation characterisation of rough mc-silicon surfaces by confocal microscopy and EBSD**, Surface and Interface Analysis 45 (2013) 781–786.

Konferenzbeiträge

12th International Symposium on Biomineralization

- A. Pisera, D. Kurek, P. Simon, V. Sivkov, M. Tsurkan, M. Wysokowski, H. Ehrlich: **Demineralization of Cambrian demosponge *Vauxia gracilenta*: Isolation and identification of skeletal chitin**, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.
- I. Zg³obicka, M. Wysokowski, S. Kaiser, V. V. Bazhenov, A. Makarova, D. Vyalikh, E. Zawadzak, J. Zdunek, M. Płocinska, T. Płocinski, M. Motylenko, T. Noga, P. V. Sundareswar, A. Witkowski, K. J. Kurzyd³owski, H. Ehrlich: **First investigations into biominerals formation within stalks of fouling diatom *Didymosphenia geminate***, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.
- O. Petrova, V. Sivkov, S. Nekipelov, D. Vyalikh, S. Molodtsov, V. Bazhenov, H. Ehrlich: **Application of the NEXAFS-spectroscopy for biominerals analysis**, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.
- S. Ueberlein, K. Kunze, H. Niemann, R. Schulze, H. Ehrlich, E. Brunner, P. Proksch, K.-H. van Pee: **Brominated skeletal components of the marine demosponges *aplysina cavernicola* and *ianthella basta***, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.
- T. Jasionowski, M. Wysokowski, A. Ehrlich, Z. Kljajic, T. Szatkowski, D. Stawski, H. Ehrlich: **In vitro extreme biomimetic silicification of 3D chitinous scaffolds isolated from *Aplysina aerophoba* marine sponge skeleton**, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.
- M. Wysokowski, V. V. Bazhenov, H. Ehrlich, T. Jasionowski: **Extreme biomimetic mineralization of poriferan chitin with use of polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS)**, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.
- T. Szatkowski, M. Wysokowski, V. Bazhenov, H. Ehrlich, T. Jasionowski: **Preparation of silica-spongin bio-composite under hydrothermal conditions**, Biomin12, Freiberg, 2013, Poster.



21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie

- C. Richter, D. Novikov, M. Zschornak, E. Mehner, D. C. Meyer: **Influence of polarization switching on the Diffraction Anomalous Fine Structure in ultra-thin, ferroelectric barium titanate films**, 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Freiberg, 2013, Vortrag.
- B. Abendroth, S. Rentrop, T. Moebus, R. Strohmeyer, F. Hanzig, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Anatase and rutile formation in atomic layer deposition of TiO₂**, 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Freiberg, 2013, Vortrag.



- J. Hanzig, M. Zschornak, F. Hanzig, B. Abendroth, E. Mehner, H. Stöcker, C. Röder, A. Talkenberger, G. Schreiber, D. Rafaja, S. Gemming, D. C. Meyer: **Electric field stabilized polar phase in strontium titanate single crystals at room temperature**, 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Freiberg, 2013, Vortrag.
- H. Stöcker, M. Zschornak, B. Abendroth, A. Lehmann, C. Richter, D. C. Meyer: **Strontium Titanate Surface Modifications due to Nitrogen Implantation investigated by Grazing Incidence X-ray Absorption Near-Edge Spectroscopy**, 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Freiberg, 2013, Vortrag.
- M. Nentwich, M. Zschornak, C. Richter, D. C. Meyer: **Local electronic structure studies of Ho_2PdSi_3 using Diffraction Anomalous Fine Structure**, 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Freiberg, 2013, Poster.
- S. Jachalke, E. Mehner, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Measurement of pyroelectric properties and ferroelectric to paraelectric phase transition of semicrystalline PVDF and P(VDF-TrFE)**, 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Freiberg, 2013, Poster.

Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2013

- F. Hanzig, C. Richter, J. Hanzig, E. Mehner, H. Stöcker, B. Abendroth, D. C. Meyer: **Temperature and time dependent in situ crystallization of strontium titanate thin films**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg, 2013, Poster.
- P. Hofmann, M. Vinnichenko, S. Cornelius, B. Abendroth, K. H. Heinig, S. Gemming, D. C. Meyer: **Dewetting of silver films on Al-doped ZnO for plasmonic nanofilm formation**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg, 2013, Poster.
- T. Köhler, E. Mehner, J. Hanzig, G. Gärtner, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Optical characterization of the protonation and deprotonation of pyroelectric single crystals**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg, 2013, Poster.
- S. Rentrop, B. Abendroth, T. Moebus, R. Strohmeyer, A. Schmid, D. C. Meyer: **Atomic Layer deposition of TiO_2 from TDMAT and H_2O : Evolution of microstructure and resulting resistance switching characteristics**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg, 2013, Poster.

64. Berg- und Hüttenmännischer Tag

- M. Franke, U. Ratayski, B. Abendroth: **Strukturen für resistives Schalten**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.
- Th. Behm, E. Schmid, C. Funke, O. Pätzold, H. Berek, M. Stelter: **Untersuchungen zur Versetzungsanordnung in multikristallinem Silizium**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.
- R. Helbig, H.-J. Möller: **Simulation der Versetzungsdichte in multikristallinem Silizium**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.

- K. Krockert, H.-J. Möller, D. C. Meyer, B. Abendroth, D. Rafaja, W. Skorupa: **Solarzellen-Prozessierung mittels Plasma-Immersions-Ionenimplantation und Blitzlampentemperung: Untersuchung der Wasserstoffpassivierung**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.
- J. Hanzig, M. Zschornak, F. Hanzig, B. Abendroth, E. Mehner, H. Stöcker, C. Röder, A. Talkenberger, G. Schreiber, D. Rafaja, S. Gemming, D. C. Meyer: **In-situ-Röntgenbeugung während elektrischer Formierung von Strontiumtitanat – Bildung einer migrationsinduzierten feldstabilisierten polaren Phase**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.
- H.-J. Möller: **On the origin of saw marks in slurry based sawing**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.
- S. Würzner: **Subsurface damage in as-sawn silicon wafers**, 64. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 2013, Vortrag.

Weitere Tagungen

- C. Richter, D. V. Novikov, E. Kh. Mukhamedzhanov, J. Stempfer, K. A. Akimova, E. N. Ovchinnikova, A. P. Oreshko, V. E. Dmitrienko, D. C. Meyer: **The physics behind forbidden X-ray resonant reflections in para- and ferroelectric phases of RbH_2PO_4** , 3rd Workshop on Resonant Elastic X-ray Scattering in Condensed Matter, Oxford, Großbritannien, 2013, Poster.
- M. Nentwich, M. Zschornak, C. Richter, D. V. Novikov, D. C. Meyer: **Structure Determination of Ho_2PdSi_3 using DAES *inter alia* at a satellite reflection**, 3rd Workshop on Resonant Elastic X-ray Scattering in Condensed Matter, Oxford, Großbritannien, 2013, Poster.
- C. Richter, D. V. Novikov, D. C. Meyer: **Influence of the polarization on the Diffraction Anomalous Fine Structure in ultra-thin barium titanate films**, DESY Photon Science User Meeting, Hamburg, 2013, Poster.
- M. Nentwich, M. Zschornak, C. Richter, D. C. Meyer: **Structure Determination of Ho_2PdSi_3 using Diffraction Anomalous Fine Structure**, 2nd International School on Aperiodic Crystals, Bayreuth, 2013, Poster.
- C. Funke, E. Schmid, Th. Behm, O. Pätzold, H. Berek, M. Stelter: **Untersuchungen zur Versetzungsanordnung in multikristallinem Silizium**, Deutsche Kristallzüchtungstagung, Erlangen, 2013, Vortrag.
- E. Schmid, C. Funke, W. Fütterer, G. Gärtner, L. Raabe, S. Reißnweber, L. Raabe, O. Pätzold: **Investigations of Dislocations and Precipitates in Multicrystalline Silicon**, 19th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Keystone, USA, 2013, Vortrag.

Angebotene Lehrmodule

- **Energiewandlung und Speicherung**, zur Hälfte durch Dr. Holger Neuhaus,
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Halbleitermaterialien**, Dr. habil. Lars Rebohle,
Wintersemester und Sommersemester, 2×2 SWS Vorlesung, 2×1 SWS Übung, 2×1 SWS Praktikum.
- **Material Properties – Semiconductors (Englisch)**, Dr. Hartmut Stöcker,
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Moderne Methoden der Festkörperphysik: Magnetische Materialsysteme**, Dr. Kay Potzger,
Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum.
- **Modultechnik**, Prof. Ingo Schwirtlich,
Wintersemester und Sommersemester, 2×2 SWS Vorlesung.
- **Physik der Halbleiter**, Prof. Dirk C. Meyer, Matthias Zschornak,
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung.
- **Physik für Ingenieure**, Praktikumsplanung durch Dr. Hartmut Bergelt,
Wintersemester (Teil I): 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum,
Sommersemester (Teil II): 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung.
- **Physik für Naturwissenschaftler I**, Prof. Dirk C. Meyer,
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Physik für Naturwissenschaftler II**, Prof. Dirk C. Meyer,
Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 4 SWS Praktikum.
- **Physik und Charakterisierung von Industriesolarzellen**, Dr. Holger Neuhaus,
Sommersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Solarzellen: Technologie und industrielle Produktion**, Prof. Dr. Ralf Lüdemann,
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Struktur der Materie I: Festkörper**, Dr. Claudia Funke,
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Struktur der Materie II: Elektronische Eigenschaften**, Dr. Claudia Funke,
Sommersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit kristallinen Materialien**, Dr. Tilmann Leisegang,
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung, 2 SWS Praktikum.

Graduierungen und studentische Arbeiten

Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- Anke Bertram: **Anwendungen und Varianten der Röntgenabsorptionsspektroskopie**, Forschungsbezogenes Projektseminar, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Doreen Eger: **Ausgewählte Anwendungen pyroelektrischer Schichten**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Diana Karsch: **Grundlagen der photoelektrochemischen Wasserspaltung am Beispiel der SrTiO₃-Ruddlesden-Popper-Phasen**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Rocco Liebschner: **Eignung evaneszenter Wellen zur Oberflächendesinfektion**, Forschungsbezogenes Projektseminar, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Theresa Moebus: **Photoelektronenspektroskopie an Strontiumtitanat**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Manuel Rothenberger: **Wasserstoffgewinnung: Bedeutung und Konzepte**, Forschungsbezogenes Projektseminar, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Juliane Erdmann: **Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der I-V-Kennlinie von Siliziumsolarzellen**, Bachelorarbeit, Fraunhofer THM, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Felix Jung: **Korrelation und Photolumineszenz-Messungen an Halbleiterwerkstoffen mit optischen und elektrischen Charakterisierungsmethoden**, Bachelorarbeit, Fraunhofer THM, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Michael Voigt: **Modellierung des optischen Strahlenganges einer neuartigen Röntgenoptik auf Basis der Forward-Raytracing-Methode**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Tina Weigel: **Charakterisierung der elektrischen Parameter eines Röntgendetektors auf Basis eines neuartigen Multilayerspiegels**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Doreen Eger: **Optimierung der kristallinen und morphologischen Parameter nasschemisch hergestellter LiNbO₃-Schichten**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Patrick Hofmann: **In-situ photoluminescence investigations on SrTiO₃ during electroformation**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Sven Jachalke: **Measurement of pyroelectric properties and investigation of ferroelectric-paraelectric phase transitions of semicrystalline PVDF and P(VDF-TrFE)**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Diana Karsch: **Nasschemische Synthese und Charakterisierung von SrTiO₃-Ruddlesden-Popper-Schichten für die photoelektrochemische Wasserspaltung**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.

- Theresa Moebus: **Photoelektronenspektroskopie zum Verhalten von Sauerstoffvakanzen im Strontium-titanat-Einkristall**, Masterarbeit, IFW Dresden, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Lars Rebohle: **Si-basierte Photonik – ein Überblick**, Habilitation, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Experimentelle Physik, 2013.

Photovoltaik

- Karl Bedrich: **Bestimmung der Silizium-Schmelzgrenze durch Elektronenstrahlverfahren**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Evelyn Herzog: **Untersuchungen zu verstärkter temperatur- und lichtinduzierter Degradation von rückseitenpassivierten Solarzellen**, Masterarbeit, Hanwha Q-Cells, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Fabian Hillig: **Untersuchung und Bewertung des Einsatzes von sphärischen Siliziumsolarzellen im Automobil**, Diplomarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Jens Hirsch: **Einfluss der rückseitigen Fehlkontaktierung kristalliner Silizium-Solarzellen auf deren elektrische Eigenschaften im Modul**, Masterarbeit, Hanwha Q-Cells, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Henry Zimmer: **Entwicklung eines selektiven Vorderseitenfeldes für Silizium-Solarzellen mit n-dotierter Basis und rückseitigem Emitter**, Masterarbeit, Hanwha Q-Cells, Institut für Experimentelle Physik, 2013.
- Teresa Orellana Peréz: **Mechanical Behavior of Alternative Multicrystalline Silicon for Solar Cells**, Doktorarbeit, Fraunhofer ISE, Institut für Experimentelle Physik, 2013.

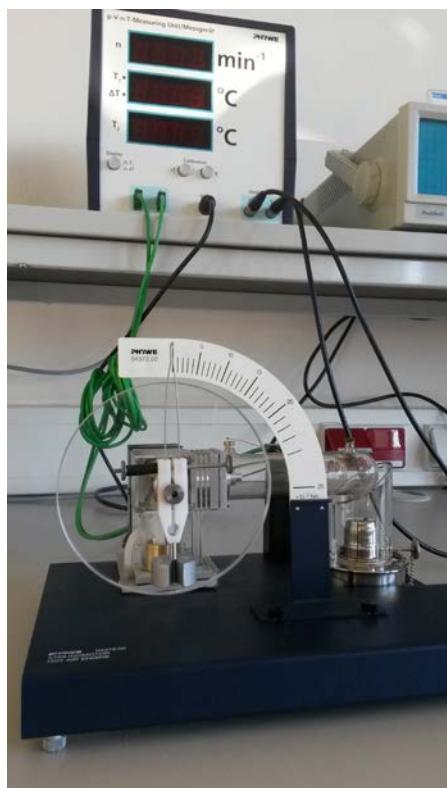
Physikalisches Grundpraktikum

Das Praktikum zu den Vorlesungen „Physik für Naturwissenschaftler“ und „Physik für Ingenieure“ absolvieren am Institut für Experimentelle Physik ca. 800 Studierende pro Jahr. Für neun naturwissenschaftliche Studiengänge (z. B. Naturwissenschaften, Chemie, Geologie/Mineralogie u. s. w.) werden jeweils 12 Termine während des ersten Sommersemesters und für 17 ingenieurwissenschaftliche Studiengänge (z. B. Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Verfahrenstechnik u. s. w.) werden jeweils 7 Termine während des ersten Wintersemesters dafür genutzt. Die Versuche dauern 3,5 Stunden und werden nach den besonderen Anforderungen der Studiengänge aus 20 verschiedenen Experimenten, die jeweils zweifach in den Räumen des IEP angeordnet sind, ausgewählt.

Das Praktikum zeichnet sich durch eine moderne Geräteausstattung aus, die auch Schülern zum Kennenlernen der Uni zur Verfügung steht. Das Praktikumsteam betreut spezielle Experimente für die „Schüleruniversität“, für das Schülerlabor „Science meets School“ und für das Herder-Gymnasium in Pirna, mit dem eine langjährige Partnerschaft besteht. Die Arbeitsunterlagen für die Versuche können die Studierenden und Schüler online abrufen.

Im Praktikum können Erfahrungen und Fertigkeiten zum Planen, Durchführen und Auswerten grundlegender Experimente aus den Gebieten Mechanik,

Elektrizitätslehre, Wärmelehre, Atomphysik und Optik erworben werden. Dies beinhaltet die Bedienung von Messgeräten, die Anfertigung von Versuchsprotokollen sowie die Nutzung von Computern zur grafischen Darstellung und Auswertung von Messreihen. Dabei werden grundlegende wissenschaftliche Arbeitsweisen trainiert.



Impressum

Herausgeber

Prof. Dr. Dirk C. Meyer
TU Bergakademie Freiberg
Institut für Experimentelle Physik
Leipziger Straße 23
09596 Freiberg

Kontakt

Telefon: 03731 39 2892
Fax: 03731 39 4314
Web: www.exphys.tu-freiberg.de

Redaktion

Dr. Hartmut Stöcker
Institut für Experimentelle Physik

Druck

Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg

Copyright

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Für die Nutzung von Texten, Grafiken, Fotos oder anderen Inhalten bitten wir um Kontaktaufnahme.

Titelbild

Darstellung des Strukturfaktors von Rutil als Tensor, der sich aus der Streuung an den asphärischen Ti-Atomen ergibt. © 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, DOI: 10.1002/crat.201470001.

Bildquellen

- 1 Medienzentrum
- 3 Hartmut Stöcker
- 5–17 Sven Jachalke, Hartmut Stöcker
- 18 Medienzentrum
- 19 Sven Jachalke
- 20 Vasilii Bazhenov
- 21 André Ehrlich
- 22 Konstantin Tabachnik
- 23 Vasilii Bazhenov, Hermann Ehrlich, Sabine Kaiser, Iaroslav Petrenko, Izabela Zglobicka
- 24 Medienzentrum
- 25 Serguei Molodtsov
- 28 Ingo Schwirtlich
- 30–34 Barbara Abendroth
- 35–38 Tilman Leisegang
- 39 Hartmut Stöcker
- 40 Corinne Wendler
- 45 Conventus
- 46–47 Sven Jachalke, Alena Raatz
- 48 Vasilii Bazhenov, Medienzentrum
- 49 Medienzentrum
- 50 Alena Raatz
- 51 Clemens Forman
- 53–54 Sabine Kaiser
- 62 Hartmut Bergelt