

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

für den vorliegenden Jahresbericht 2015 des Instituts für Experimentelle Physik (IEP) steht mein herzlicher Dank für die durch alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter geleistete Arbeit an erster Stelle. Diese führte in Lehre und Forschung erneut zu messbaren Erfolgen und einer weiteren Steigerung des Ansehens des IEP sowie seiner wissenschaftlichen Ausstrahlung und Positionierung. Dabei war jeder individuelle Beitrag wichtig.

Besonders zu nennen sind natürlich die im Jahr 2015 erzielten zahlreichen Abschlüsse in vielfältigen Stufen der fachlich-wissenschaftlichen Qualifikation. Dabei zolle ich den aufgebrauchten Betreuungs- und allgemein Lehrleistungen meinen besonderen Respekt.

Auch im Jahr 2015 konnten unsere Studierenden wiederum im Rahmen von Exkursionen und Blockvorlesungen moderne Methoden an Großforschungseinrichtungen kennenlernen. Neben unserer aktiven Teilnahme an internationalen Fachkonferenzen und Seminaren war das IEP zum zweiten Mal Gastgeber und Ausrichter der Internationalen Freiburger Tagung zu Energiespeichermaterialien (EStorM). Auf der Grundlage langjährig aufgebauter Kompetenzen wurde der organisatorische Grundstein für das Freiberg Zentrum für pyroelektrische Anwendungen gelegt.

Außerordentlich freut es mich, dass unsere Nachwuchswissenschaftler in vielfältiger Form Anerkennung für ihre Leistungen erhalten haben. Beispiele sind die Prämierung als beste Tagungsbeiträge sowie die Aufnahme in wissenschaftliche Gesellschaften. Unsere Forschungsergebnisse sind nicht nur durch die Liste der Publikationen und Patente wahrnehmbar, vielmehr sind auch unterschiedlichste Medien auf unsere aktuellen Arbeiten und deren Zukunftsperspektiven aufmerksam geworden. Der



Bogen spannt sich inzwischen von der Presse über den Hörfunk bis hin zum Fernsehen.

Die Positionierung und internationale Sichtbarkeit des IEP war nach meiner Einschätzung auch maßgeblich mitentscheidend für die erfolgreiche Einwerbung eines Forschungsbaus, der mit einem Gesamtvolumen von 41,5 Mio. Euro als Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) in den nächsten fünf Jahren für gemeinsame Perspektiven aller einschlägig arbeitenden Wissenschaftler der Technischen Universität Bergakademie Freiberg auf dem Campus errichtet wird. Dies leite ich auch aus dem besonderen Stellenwert von Fragen der Materialforschung sowie der Energiewandlung und -speicherung im Zusammenhang ab. Entsprechend möchte ich Ihnen auch in meiner Eigenschaft als Sprecher der Initiative und Direktor des ZeHS dafür danken, dass die Gutachter des Wissenschaftsrats Vertrauen in eine erfolgreiche Umsetzung des Baus und der Forschungsprogrammatis in das Antragskonsortium setzten. Zugleich danke ich allen für die mir in der mehrjährigen Phase der Antragstellung gewährte Unterstützung.

Ich freue mich auf die weitere Zusammenarbeit im Jahr 2016 und auf Gelegenheiten, gemeinsam spannende wissenschaftliche Fragestellungen ins Auge zu fassen.

Mit besten Grüßen und Glückauf

Direktor des IEP und des ZeHS

Inhalt

Das Institut für Experimentelle Physik	4
Das Institut	5
Die Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik	6
Geräte am Institut für Experimentelle Physik	8
Bearbeitete Stoffsysteme	12
Arbeitsgruppen	14
Arbeitsgruppe Prof. Dirk C. Meyer „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“	15
Arbeitsgruppe Prof. Hermann Ehrlich „Biomining und Extreme Biomimetik“	21
Arbeitsgruppe Prof. S. Molodtsov „Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“	26
Arbeitsgruppe Jun.-Prof. Roman Gumenuik „Kristallphysik“	35
Gast-Professor Ingo A. Schwirtlich „Photovoltaik: Modultechnik und Modulmaterialien“	38
Methodisches Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien	40
Methodisches Kompetenzzentrum Energiematerialien	46
Projekte	50
BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept	51
BMBF-Verbundprojekt SyNeSteSia	58
BMU-Verbundprojekt BaSta – Batterie Stationär in Sachsen	60
<i>Chemical Crystallography Beamline</i> am DESY-Synchrotron PETRA III	62
Freiberg Zentrum für pyroelektrische Anwendungen	64
Mining-RoX – Intelligente Roboter im Bergwerk	68
Röntgenfluoreszenzanalyse an Objekten der Sammlung für Bergbaukunde	71
VIP-Vorhaben Pyro-Funk	73
Virtuelles Institut MEMRIOX	74
Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung	76
Veranstaltungen	80
Bericht zur 2. Internationalen Freiburger Tagung zu Energiespeichermaterialien (EStorM)	81
Jubiläumjahr 2015	83
Kennenlernen des Lehr- und Forschungsangebots des DESY und des <i>European XFEL</i>	86
Weihnachtsfeier 2015	88
Publikationen und Lehre	90
Publikationen	91
Konferenzbeiträge	95
Graduierungen und studentische Arbeiten	99
Angebotene Lehrmodule	101
Physikalisches Grundpraktikum	103
Impressum	104

Das Institut für
Experimentelle Physik

Das Institut

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 Bioanwendungen. Mehrere interdisziplinäre Arbeitsgruppen befassen sich für die entsprechenden Substanzklassen mit der Synthese und der Aufklärung von Struktur-Eigenschaft-Beziehungen. Dazu beteiligt sich das Institut für Experimentelle Physik aktiv am Ausbau und Unterhalt des Zentralen Reinraumlabor 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 u. a. *European XFEL*, DESY und BESSY).

In der Geschichte der TU 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 chemischen 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 seinerzeit „modernen“ Fachrichtungen wie Atom-, Kern- und Festkörperphysik betraut wurde. Es setzte damit die Tradition des im Jahr 1948 aufgelösten Radiuminstituts fort. Zusammen mit dem im Jahr 1940 geschaffenen Institut für Geophysik und dem im Jahr 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 (im Bild in einer besonderen optischen Variante).



Die Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik



von links oben nach rechts unten:

Dr. Vasilii 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 Reußenweber, Dr. Tilmann Leisegang, Diana Karsch, Bianca Störr, Doreen Eger, Maximilian Sonntag, Falk Meutzner, Dr. Matthias Zschornak, Dr. Günter Gärtner, Alena Ratz, Stefanie Schlesinger, Dr. Hartmut Bergelt, 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.

Institut für Experimentelle Physik

Anschrift

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

Institutsdirektor

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

Sekretariat

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

Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

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

Biomineralogie und Extreme Biomimetik

Prof. Dr. 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

Juniorprofessor Kristallphysik

Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk
Tel.: 03731 39 4268
roman.gumeniuk@physik.tu-freiberg.de

Kompetenzzentren

Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien

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

Kompetenzzentrum Energiematerialien

Dr. Tilmann Leisegang
Tel.: 03731 419 6169
tilmann.leisegang@physik.tu-freiberg.de

Infrastruktur

Chemielabore

Thomas Behm
Tel.: 03731 39 3228
thomas.behm@physik.tu-freiberg.de

Elektronische Werkstatt

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

Mechanische Werkstatt

Christoph Immer
Tel.: 03731 39 2246
christoph.immer@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

Spektroskopie-Pool

Dr. Günter Gärtner
Tel.: 03731 39 4087
ggaertner@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

Geräte am Institut für Experimentelle Physik

Beschichtung

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

Elektrische Messungen

- CAIC, *Current Analysis by Inductive Coils*
- Gamry Reference 600, Potentiostat
- Hall-Messplatz
- Keithley 4200, Vierspitzenmessplatz
- LBIC, *Laser Beam Induced Current*
- Oriol Sol1A, Sonnensimulator
- Polarisierungsaufbau im elektrischen Feld
- Pyroelektrischer Messplatz mit HV-Kammer
- Pyroelektrischer Messplatz mit UHV-Kammer
- Sinton WCT 120, Lebensdauermessung
- SPV, *Surface Photo Voltage*
- Vierpunkt-Messung im REM/FIB inkl. EBIC

Mechanische Probenbehandlung

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

Mikroskopie

- 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

Röntgendiffraktometrie

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

Spektroskopie

- Bruker IFS 113v, FTIR-Spektrometer
- Bruker S1 Titan, Handspektrometer
- Bruker S8 Tiger, wellenlängendispersives Röntgenfluoreszenzspektrometer
- Bruker Tensor 27, FTIR-Spektrometer
- Bruker Tensor 37, FTIR-Spektrometer
- EDX und 3D-EDX am FIB/REM
- Hiden HPR20, Massenspektrometer
- J. A. Woollam M2000 DI, Ellipsometer
- MiniScope MS 5000, ESR-Spektrometer
- optischer Spektroskopie-Messplatz
- Specord S600, UV/Vis-Spektrometer
- Thermo Fisher Escalab 250Xi, Röntgenphotoelektronenspektrometer

Temperaturbehandlung

- Carbolite, Rohrofen bis 1200 °C
- Gero, Zehnzonenofen 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

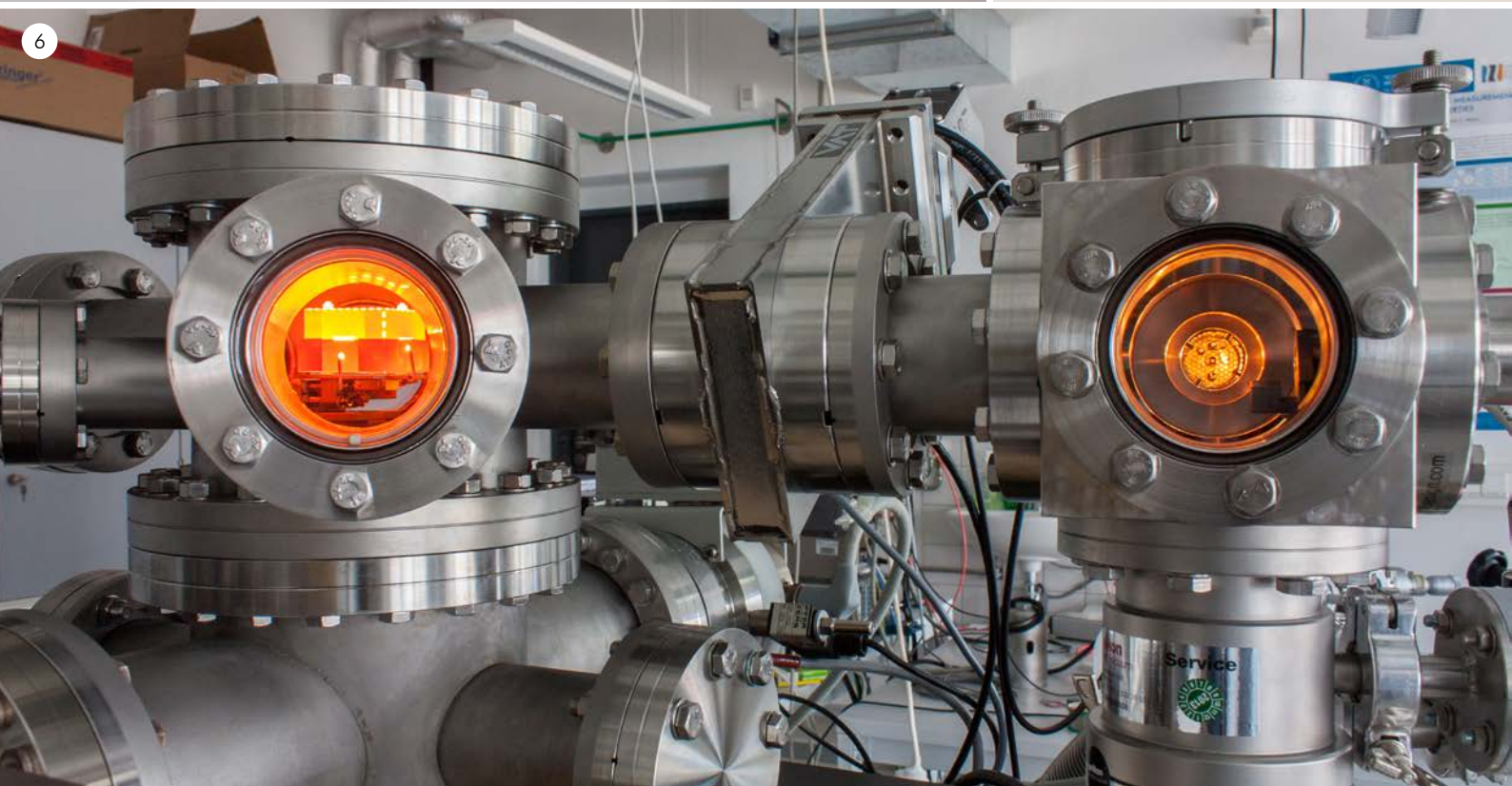
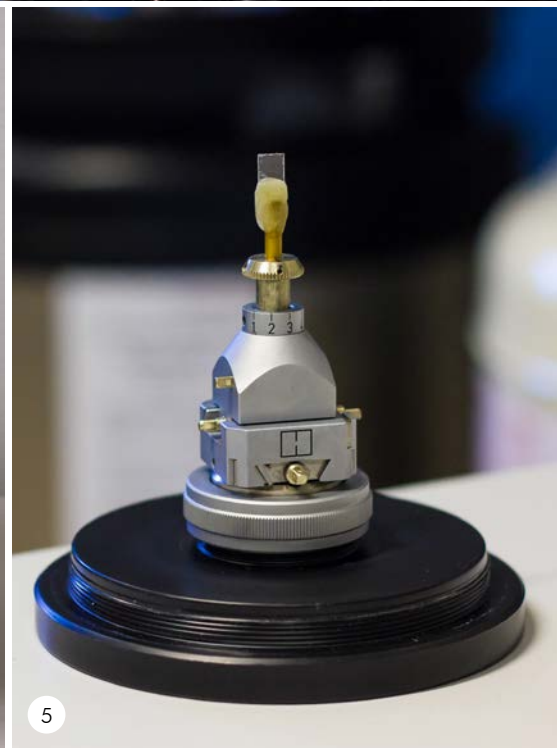
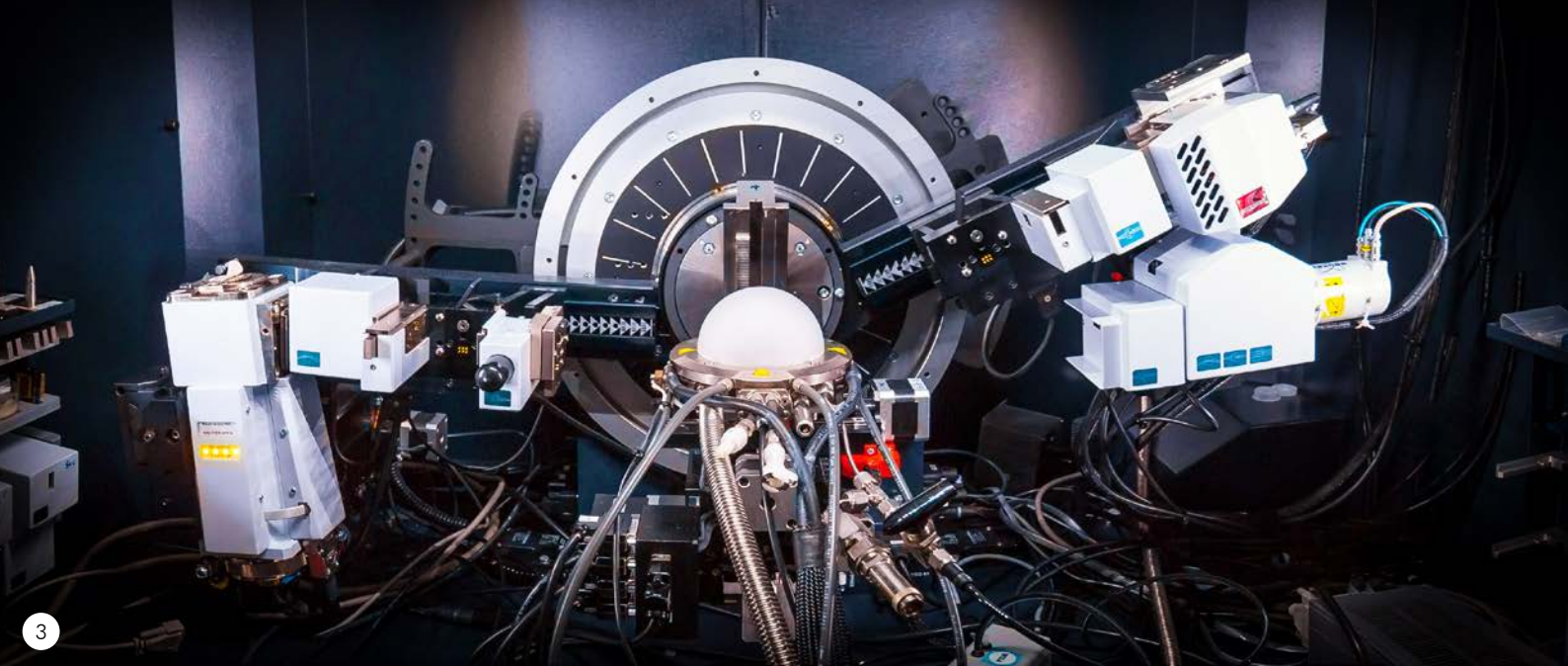
Topographie

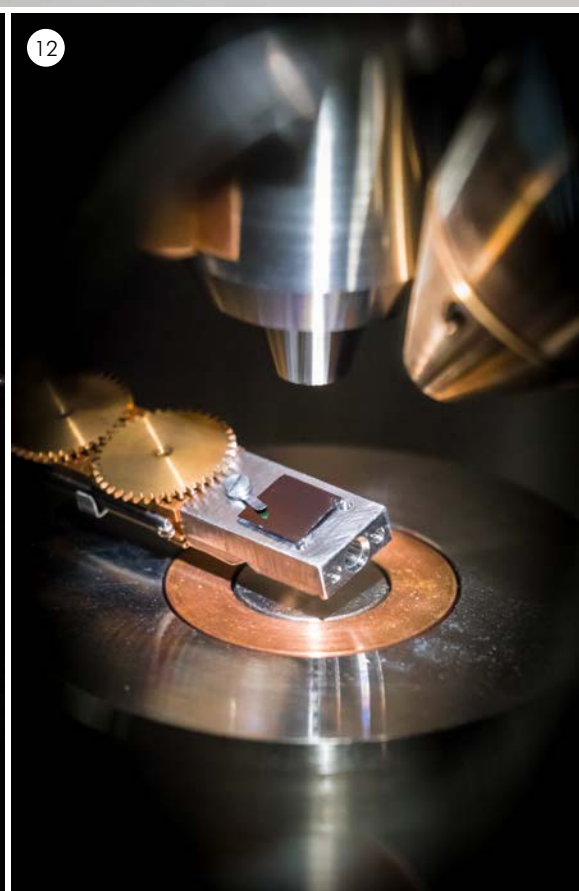
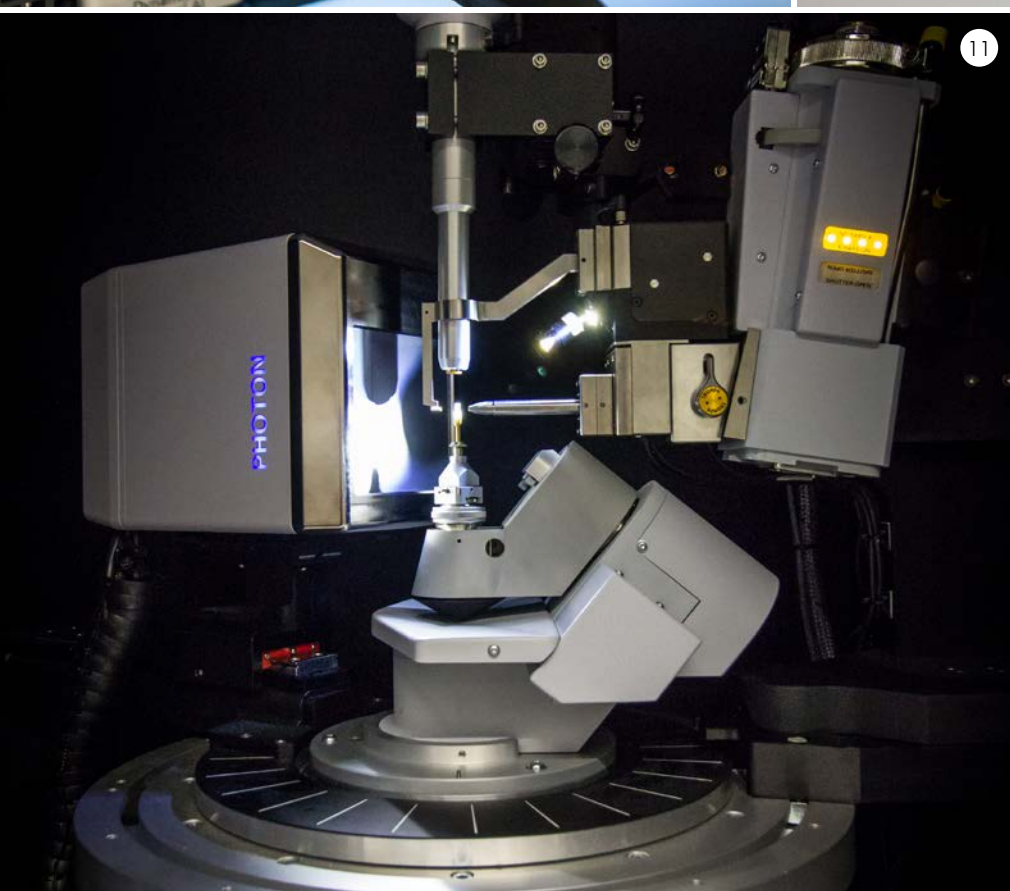
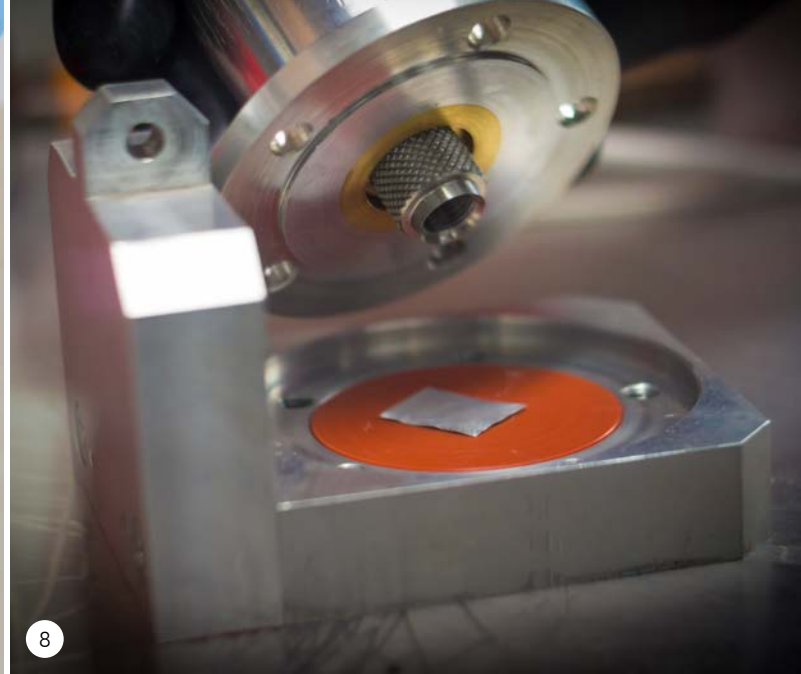
- DI Dimension 3000, Rasterkraftmikroskop
- Olympus Lext, Konfokalmikroskop
- Polariskopie, Spannungstopographie
- Tencor, mechanisches Profilometer
- UBM Microfocus Expert, Lasertopograph
- Veeco Multimode V, Rasterkraftmikroskop

Bilder auf den nächsten Seiten:

- 1 Blick ins Labor für pyroelektrische Materialien
- 2 Präparation einer Batteriezelle in der Glove-Box
- 3 Bruker D8 Discover mit Hochtemperaturkammer
- 4 ESR-Spektrometer MiniScope MS 5000
- 5 Goniometerkopf mit Einkristallprobe
- 6 UHV-Kammer für pyroelektrische Messungen
- 7 Vorbereitung einer Probe für XPS-Messungen
- 8 Stanzen einer Elektrode
- 9 NI cRIO-Messsystem für pyroelektrische Messungen
- 10 Teflon-Messzelle für die photokatalytische Wasserspaltung
- 11 Bruker D8 Quest Einkristalldiffraktometer
- 12 Probe im Photoelektronenspektrometer







Bearbeitete Stoffsysteme

Verbindungshalbleiter

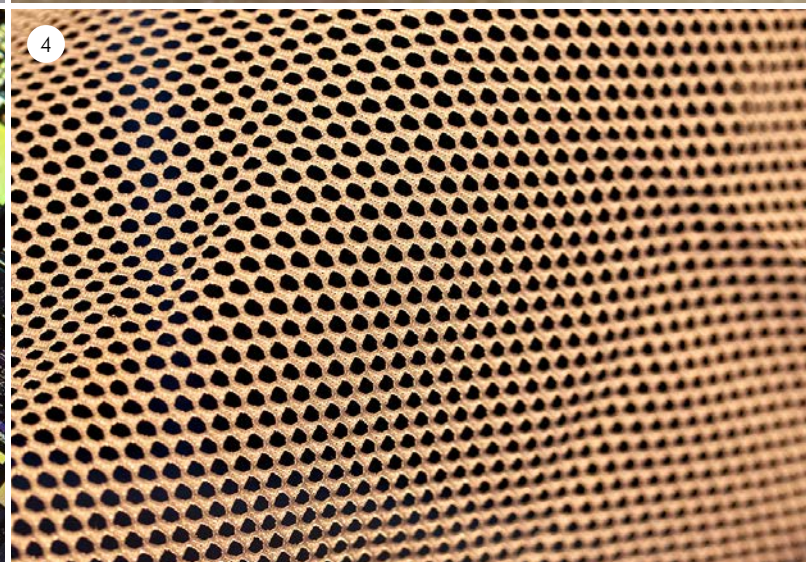
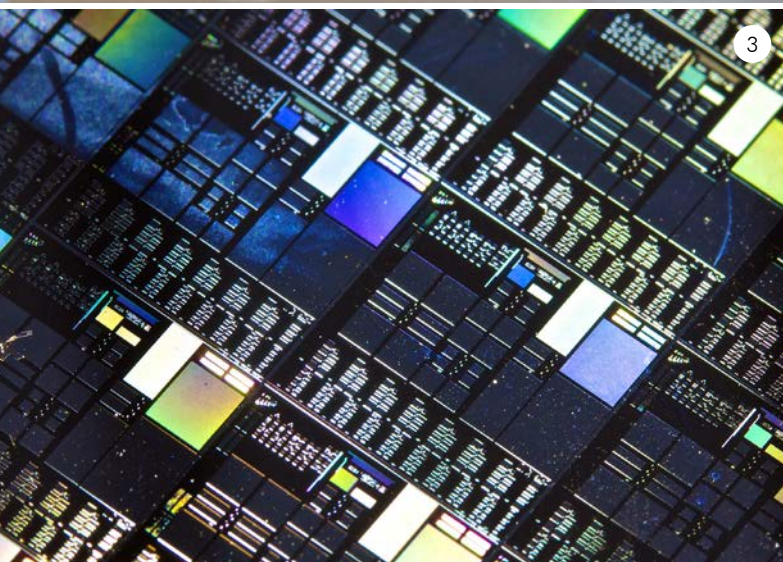
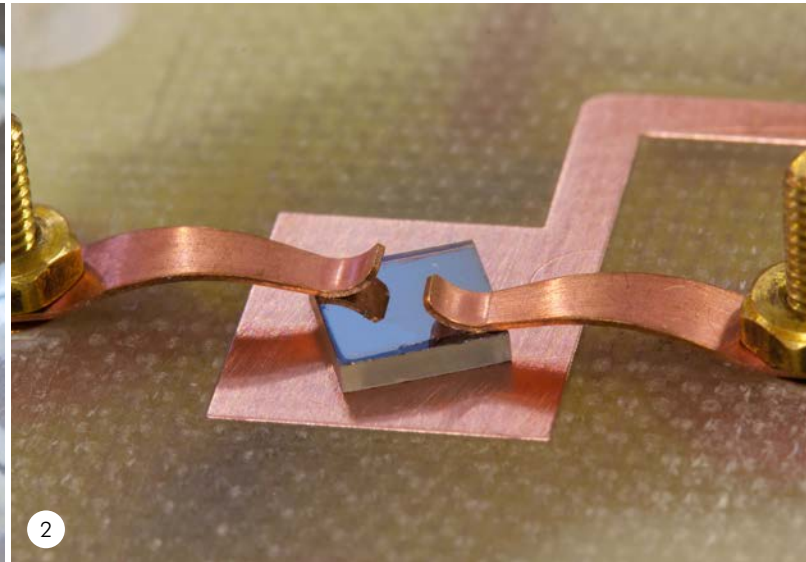
- oxidische Halbleiter (z. B. TiO_2 und SrTiO_3) in Form von Einkristallen oder dünnen Schichten
- Oxide in Perowskitstruktur und verwandte Strukturtypen (z. B. $\text{SrO}(\text{SrTiO}_3)_n$)
- modulierte Strukturen (z. B. HoPdSi_2)
- oxidische Pyroelektrika (z. B. BaTiO_3 , LiNbO_3 und LiTaO_3)
- neuartige Systeme für Kathoden, Anoden, Elektrolyte und Separatoren
- Galliumnitrid (GaN)
- pyroelektrische Polymere (z. B. PVDF)

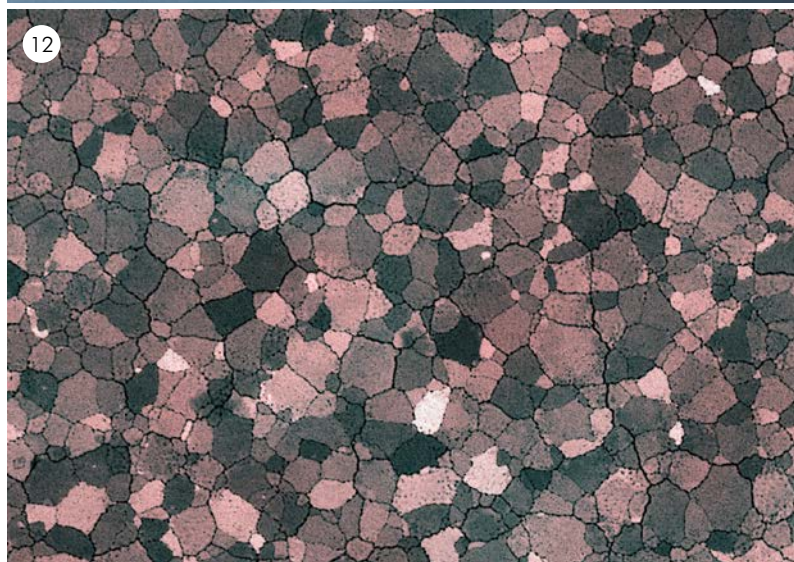
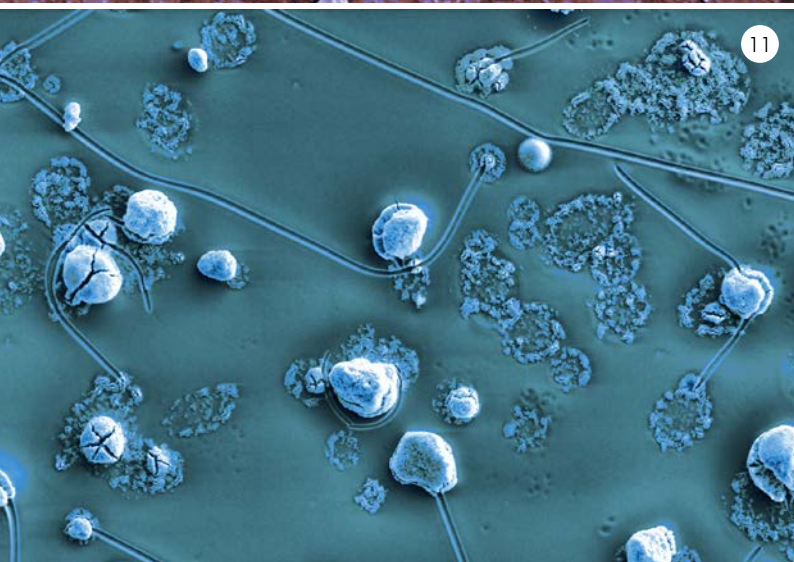
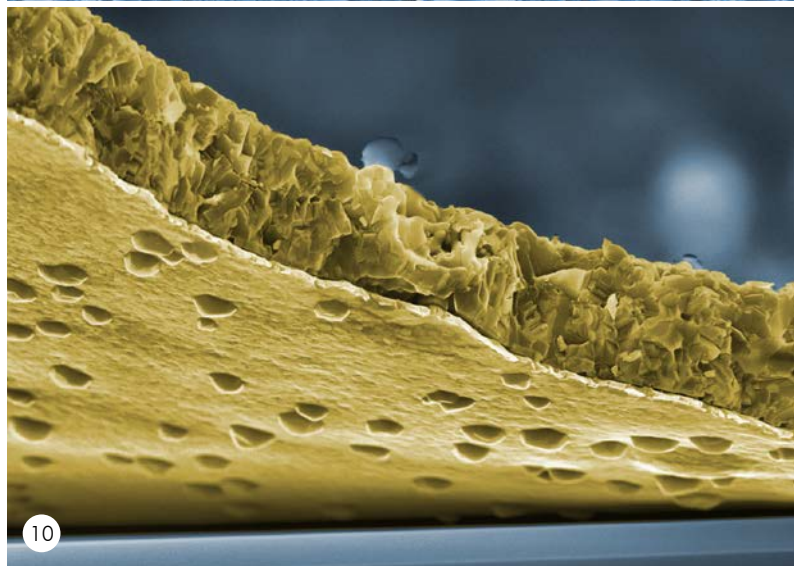
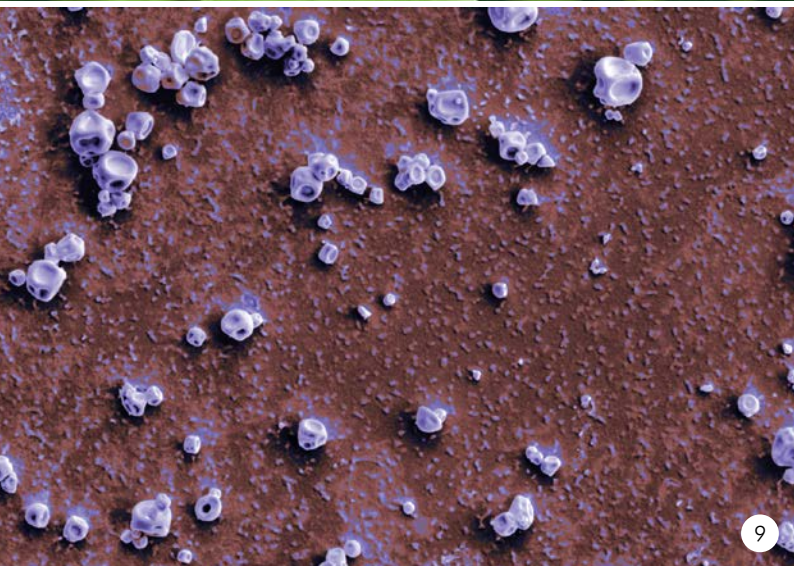
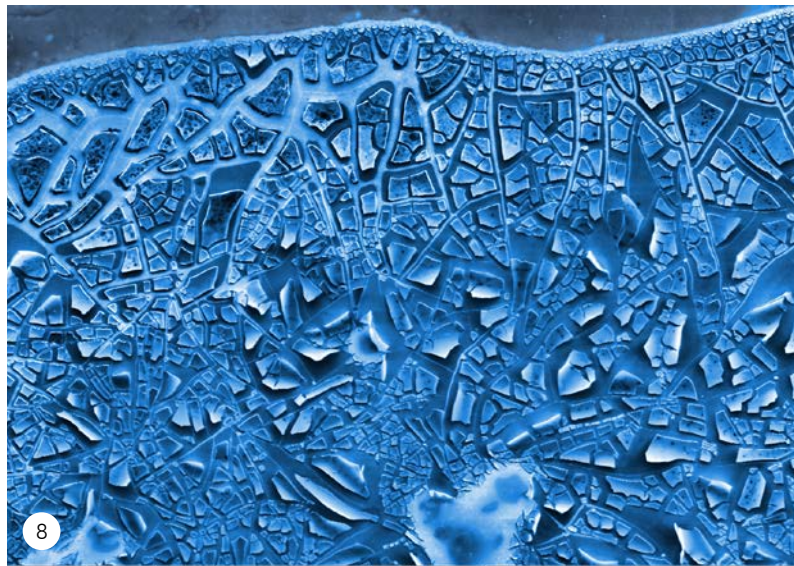
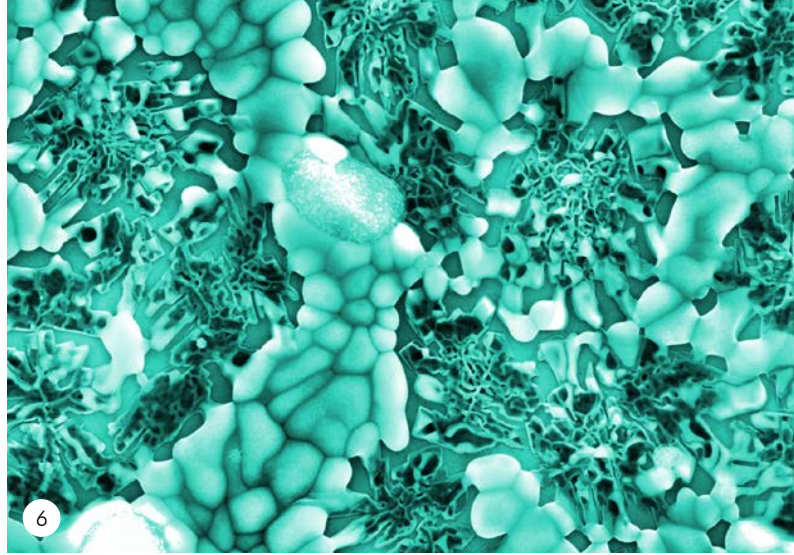
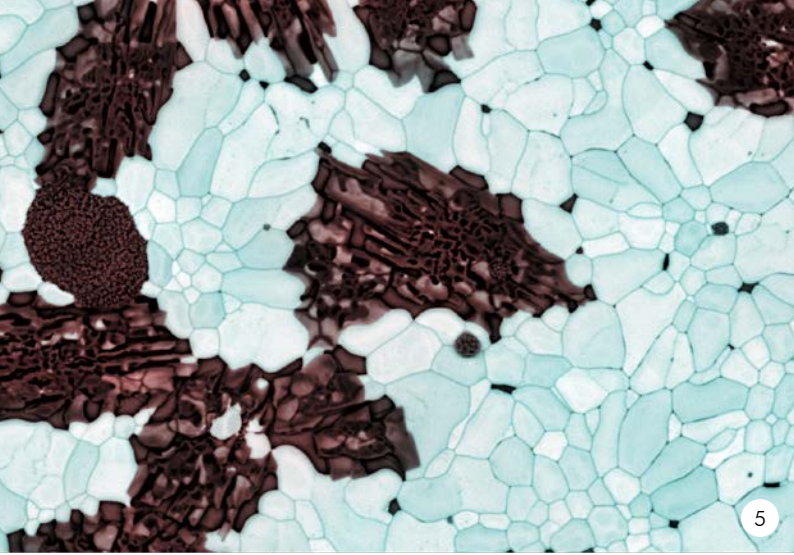
Biomaterialien

- Chitin in Verbindung mit anorganischen Oxiden
- Nanokristalline Materialien
- Schwämme und Muscheln

Bilder auf den nächsten Seiten:

- 1 Halterung zur Beschichtung von Kristallstücken
- 2 Elektrischer Probenhalter für *In-situ*-Röntgenmessungen
- 3 SrTiO_3 -Teststrukturen auf Si-Wafer
- 4 Beschichtetes Textil-Gewebe
- 5 $\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht auf Si mit Silikatbildung (braun)
- 6 Aufgeschmolzener Bereich einer $\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht
- 7 SiC-Nanodrähte mit Mikrogreifer
- 8 Abtropfkante einer Sol-Gel-Schicht
- 9 LiTaO_3 -Beschichtung mit eingebundenen Partikeln
- 10 Vom Substrat gelöste, Pt-kontaktierte $\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3$ -Schicht
- 11 BaTiO_3 -Beschichtung mit BaTiO_3 -Partikeln
- 12 Texturierte W-Elektrode auf SrTiO_3 -Schicht





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 besetzt. Für die Arbeit mit dem Schwerpunkt „Halbleitermaterialien“ steht als besondere Einheit seit dem Jahr 2008 das Zentrale Reinraumlabor der Bergakademie, 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, sichtbar.

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. Bezüglich 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 atomlagensensitiven 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 DFG-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 wirken.

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 Jahr 2004 gewürdigt. Hinzu kamen Beiträge zur Instrumentierung von Synchrotronexperimenten, wie die Entwicklung und der Bau spezifischer Halbleiterdetektoren und Arbeiten für die digitale Signalprozessierung zur Erweiterung des Dynamikbereichs 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 Bergakademie folgte Prof. Dirk C. Meyer im Jahr 2009 dem Ruf zur Übernahme dieser Professur. Thematisch stehen seither oxidische Verbindungshalbleiter bzw. Dielektrika, die häufig strukturelle Verwandtschaft zur Perowskitstruktur aufweisen, im Fokus, wobei die in dieser Materialklasse auftreten-

den Kopplungsphänomene besonders gewürdigt werden. Durch Einwerbung von Drittmitteln wurde die Infrastruktur der Arbeitsgruppe und des Instituts insbesondere im Hinblick auf die Synthese und Charakterisierung dünner Schichten stark ausgebaut. Die direkte Anbindung an das Zentrale Reinraumlabor der Bergakademie bildet eine ausgezeichnete Möglichkeit der Probenpräparation, die auch durch Investitionen von Seiten der Arbeitsgruppe erweitert wird. Als neue Methoden konnten auf diesem Wege die ALD und die Plasmaätzung im Reinraumlabor etabliert werden. Im Rahmen eines Großgeräteantrages wurden die Charakterisierungsmöglichkeiten der hergestellten Schichten um ein kombiniertes Rasterelektronenmikroskop mit Ionenstrahl (REM/FIB) erweitert.

Seit dem Jahr 2011 ist Prof. Dirk C. Meyer gleichzeitig 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. Seine bisherigen Arbeiten sind durch über 100 Publikationen in internationalen referierten Fachzeitschriften, Buchbeiträge sowie zahlreiche Patente und Patentanmeldungen dokumentiert.

Forschungsschwerpunkte

Pyroelektrische Funktionsmaterialien

Pyroelektrizität beschreibt das Verhalten bestimmter Materialien, auf eine Temperaturvariation mit einer Änderung der Oberflächenladung zu reagieren. Diese Eigenschaft, die bisher vorwiegend in der Sensorik Anwendung findet, wird innerhalb der Arbeitsgruppe hinsichtlich verschiedener neuartiger technischer Lösungen untersucht. Die bei Temperaturänderung auftretenden elektrischen Felder werden dabei nicht als Mess-, sondern als Prozessgröße erfasst.

Nach Schätzungen unterschiedlicher Energieagenturen und Institutionen gehen heutzutage weltweit mehr als 72 % des für die technische Nutzung gewandelten Energieaufkommens in Form von Abwär-

me verloren. Die anfallende Abwärme liegt dabei insbesondere im Niedertemperaturbereich und damit als ungenutzte thermische Energie vor. Im Fokus der Arbeiten stehen die wissenschaftliche Untersuchung, Entwicklung und technische Erprobung innovativer Ansätze zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme für Energie- und Stoffwandlungsprozesse durch Anwendung neuartiger pyroelektrischer Funktionsmaterialien.

Innerhalb des VIP-Vorhabens „Pyro-Funk“ wird zusammen mit dem Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden eine neuartige Beschichtung auf der Basis pyroelektrischer Materialien entwickelt. In ihrem grundsätzlichen Aufbau ist diese gleichermaßen geeignet, antibakteriell zu wirken und Oberflächen eisfrei zu halten. Die Beschichtungssysteme können zur Desinfektion von häufig kontaktierten Oberflächen und zum Schutz vereisungsgefährdeter Bauteile genutzt werden.

Die Herausforderung bei der Charakterisierung pyroelektrischer Materialien besteht in der Bereitstellung hoher Feldstärken und der gleichzeitigen Vermeidung von Durchschlägen sowie der Separation von pyroelektrischen und thermisch induzierten Beiträgen zum gemessenen Gesamtstrom. Der dafür im Institut entwickelte Präzisionsmessaufbau erlaubt die temperaturabhängige Charakterisierung von Materialien unter hohen Feldstärken und wird daher auch für Stress-Tests weiterer Funktionselemente eingesetzt.

Neuartige Energiespeichermaterialien

Elektrochemische Energiespeicher sind, neben ihrer Bedeutung für die Elektromobilität, insbesondere für den Ausbau dezentraler stationärer Anwendungen im Zusammenhang mit regenerativer Stromerzeugung unerlässlich. Dies betrifft neben der Gewährleistung der Netzstabilität besonders den Ausbau regional autarker Energieversorgung. Es ist daher ein übergeordnetes Ziel der Arbeitsgruppe, 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 zu erreichen.

Das BMBF-Verbundprojekt „CryPhysConcept“ zielt auf die Entwicklung eines Zukunftskonzepts für elektrochemische Energiespeicher sowie dessen Umsetzung und Heranführung an den Markt. Dabei stehen moderne Methoden der Kristallographie, der Kristallchemie und der kristallphysikalischen Struktur- und Eigenschaftsvorhersage sowie der Präparation und Analyse im Zentrum der Arbeiten.

Forschungsschwerpunkte des dreijährigen BMWi-Verbundprojekts BaSta – „Batterie: Stationär in Sachsen“, welches vom Fraunhofer IWS Dresden koordiniert wird, sind Materialien für die Niedrigtemperatur-Natrium-Schwefelbatterie und die dazu gehörigen Fertigungstechnologien sowie der Entwurf, der prototypische Aufbau und die experimentelle Erprobung von Natrium-Schwefel-Speichermodulen für hochkapazitive Batterie-Speicherwerke. Das Projekt wird gemeinschaftlich von Bergakademie, Fraunhofer THM Freiberg, Fraunhofer IWS Dresden und Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg bearbeitet. Mit Abschluss des Projekts soll ein neuer stationärer Batterietyp zur Speicherung elektrischer Energie entstehen. Durch sein großes spezifisches Speichervermögen, seine hohe Sicherheit und Lebensdauer sowie vertretbare Kosten soll er die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende in Deutschland verbessern helfen.

Als Teil des deutsch-russischen Ioffe-Röntgen-Instituts treibt die Arbeitsgruppe auf methodischer Seite die Entwicklung der Energiespeichertechnologien von morgen voran. Im wissenschaftlichen Fokus des von ihr koordinierten Verbundprojekts SYNESTESIA „Synchrotron- und Neutronen-basierte Untersuchungen zur Energiespeicherung“ liegt die Entwicklung neuartiger Charakterisierungsmethoden, die auf dem Einsatz von Großgeräten wie Neutronenquellen und Elektronenspeicherringen basieren. Vorrangiges Ziel ist die Aufklärung chemischer Prozesse und von Strukturveränderungen an Grenzflächen während elektrochemischer Vorgänge. Dafür werden elektrochemische Zellen entwickelt, welche die Bestimmung der Strukturen an der Grenzfläche sowie jene metastabiler und reaktiver Phasen ermöglichen. Diese Zellen werden dann unter anderem für die Charakterisierung mittels Nu-

klarer-Magnetresonanz-(NMR)-Spektroskopie und Röntgenanalytik (Bergakademie) und an den beschleunigerbasierten Photonenquellen (u. a. BESSY) und Neutronenquellen eingesetzt, um die entscheidenden Prozesse in Brennstoffzellen und Batterien zu untersuchen. Der Einsatz der komplementären Methoden wird ein tieferes Verständnis der Prozesse an elektrochemischen Grenzflächen ermöglichen, da neuartige Informationen über deren Struktur, die Ionenmobilität und den elektronischen Zustand zu erwarten sind.

Strukturelle Modifizierung von Dielektrika

In der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ wird seit geraumer Zeit an Oxiden in Perowskitstruktur und damit verwandten Strukturtypen gearbeitet. Aus der Untersuchung verschiedener Syntheseverfahren, der gezielten Einstellung 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 gezielter Steuerung 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 kontrolliert bewegt werden.

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 angestellt. 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, Ionenimplan-

tation) im thermodynamischen Gleichgewicht oder abseits davon erfolgen kann.

Das Virtuelle Institut „MEMRIOX“ ist eine von der Helmholtz-Gemeinschaft geförderte Forschungsinitiative auf dem Gebiet Ionenstrahl-modifizierter, sogenannter memristiver Funktionselemente auf der Basis von Oxiden. Memristive Elemente sind passive Bauelemente, deren elektrischer Widerstand von der Vorgeschichte 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 Bauelemente beitragen. Dafür wird ein breites Spektrum an Ionenstrahl-Techniken genutzt, um die Struktur kleinster ein- und zweidimensionaler Bereiche mit hoher räumlicher Genauigkeit zu modifizieren. Die Ionenimplantation erlaubt auf diesem Wege die gezielte Herstellung resistiver Speicher ohne das Erfordernis einer elektrischen Formierung. Das Teilprojekt der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Herstellung dielektrischer Schichten durch ALD, die in Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern durch Ionenstrahl-Techniken modifiziert werden.

Weiterentwicklung von Röntgenmethoden

Die Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie umfasst unter anderem die Photoabsorption. Ist die Energie der Röntgenstrahlung größer als die element- und schalenspezifische Ionisierungsenergie eines gebundenen Elektrons, wird ein Photon absorbiert und das Elektron aus dem Atomverband herausgeschlagen. Die an diesen spezifischen Energien sprunghaft ansteigende Absorption wird als Absorptionskante bezeichnet. Röntgenographische Messungen im Bereich der Absorptionskanten der zu untersuchenden Verbindung werden als „resonante“ Streuversuche bezeichnet, falls auf den kausal verknüpften Kanal der Streuung gezielt wird. Diese Methoden können meist nur an einem Syn-

chrotron angewendet werden, da dort die Energie der Photonen aus einem weiten Bereich gewählt werden kann.

Eine Besonderheit resonanter Röntgenstreuung ist die verstärkte Abhängigkeit der Intensität eines Bragg-Reflexes von der Polarisation der Röntgenstrahlung. Ändert man die Polarisation der Photonen bezüglich der Probe – z. B. durch Rotation – erhält man, abhängig von der Symmetrie des resonanten Atoms, charakteristische sinusförmige Oszillationen der Intensität. Diese Anisotropie kann in manchen Fällen dazu genutzt werden, Phaseninformationen über die Atomstreuamplitude zu erhalten.

Eine Konsequenz der Anisotropie in resonanter Streuung (AAS) ist, dass die betreffenden Atome nicht mehr als kugelsymmetrisch angesehen werden können, wie es gewöhnlich in der Röntgenstreuung und Kristallographie geschieht. Dies hat insbesondere zur Folge, dass kristallographische Auslöschungsregeln nicht mehr greifen, wenn sie auf Translationsymmetrien beruhen, die mit einer Rotation kombiniert wurden, wie es bei den Symmetrieelementen Schraubenachse und Gleitspiegelebene der Fall ist. Die so im resonanten Fall zusätzlich auftretenden Reflexe werden auch verbotene Reflexe genannt und zeigen eine starke Energieabhängigkeit.

Der methodische Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung dieser elementspezifischen und atomlagentensensitiven Variante der Röntgenspektroskopie wird in der Arbeitsgruppe insbesondere für die Charakterisierung struktureller Defekte vorangetrieben. Aktuell wird im Rahmen eines BMBF-Verbundvorhabens der Aufbau eines neuen Strahlrohres am Synchrotron Petra III des DESY in Hamburg zur Einrichtung einer *Chemical Crystallography Beamline* unterstützt.

Außenstelle GIZeF

Seit dem Jahr 2012 besteht für die Arbeitsgruppe des Institut für Experimentelle Physik eine Außenstelle im Gründer- und Innovationszentrum Freiberg (GIZeF), in direkter Nachbarschaft zum Fraunhofer-

Technologiezentrum Halbleitermaterialien Freiberg, einem strategischen Partner der Arbeitsgruppe.

Die Anmietung eines Gebäudeflügels erfolgt zur räumlichen und logistischen Konzentration einschlägig arbeitender Wissenschaftler sowie zur gemeinsamen Diskussion aktueller Themen, Forschungsaktivitäten und Forschungsergebnisse – auch zusammen mit externen Spezialisten und Wissenschaftlern aus Forschung und Industrie. So wurden beispielsweise strömungsmechanische Aspekte großer Flüssigmetallbatterien gemeinsam mit Dr. Tom Weier vom Institut für Fluidodynamik des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf diskutiert. Neben dem Erfahrungsaustausch mit weiteren Forschungsinstitutionen standen auch aktuelle Probleme und Bedarfe regionaler und überregionaler Unternehmen im Zentrum der Arbeiten.

Die Aktivitäten am GIZeF konzentrieren sich auf die Untersuchung von Energie- und Stoffwandlungsphänomenen, die Systematisierung bestehenden Wissens mithilfe eines Wissensmanagementsystems, die Ableitung neuer Konzepte und schließlich die Ausarbeitung von Strategien für deren Realisierung. Dazu werden mittel- bis langfristig angelegte strategische Vorhaben geplant. So sind zurückliegend verschiedene Forschungsvorhaben initiiert, Patente verfasst, Labormuster entwickelt und Demonstratoren aufgebaut worden. Ferner werden Aktivitäten zur Kommunikation der Forschungsergebnisse und Öffentlichkeitsarbeit organisiert, so u. a. die *International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials (EStorM)*, die zum zweiten Mal 2015 stattfand und den Ausbau der nationalen und internationalen Vernetzung unterstützt.

Insgesamt sind in der Außenstelle Arbeitsplätze für 20 Mitarbeiter eingerichtet und ein Beratungsraum ist vorhanden. Zudem besteht eine direkte Anbindung an den zentralen Rechencluster der TU Bergakademie Freiberg, wobei auch eigene Rechenkapazitäten geschaffen wurden. Diese werden durch Dr. Matthias Zschornak betreut. Wissenschaftlich begleitet werden die Arbeiten der Außenstelle durch Dr. Tilmann Leisegang.



Außenstelle der Arbeitsgruppe im Gründer- und Innovationszentrum Freiberg (GIZeF): Schild am Eingang (links) und Ansicht des Hauptgebäudes (rechts).



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, Dr. 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 Imer, Romy Rietzschel, Sven Jachalke, Solveig Rentrop, Tina Nestler, Dr. Teresa Orellana Pérez.

Arbeitsgruppe Prof. Hermann Ehrlich „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“

Die Arbeitsgruppe „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“ bestand im Jahr 2015 aus Prof. Hermann Ehrlich, Dr. Vasilii Bazhenov, zwei Doktoranden der TU Bergakademie Freiberg, vier assoziierten Doktoranden der TU Posen und Warschau, drei Studenten der TU Bergakademie Freiberg und Gästen, die über ERASMUS- und DAAD-Programme in der Arbeitsgruppe forschten (siehe Abb. 1).

Die Arbeitsgruppe war im Jahr 2015 auf einer Vielzahl von Symposien und Tagungen vertreten und lieferte 15 aktive Beiträge (siehe Abb. 2). Dabei präsentierte Prof. Ehrlich zwei Keynote-Vorträge. Darunter waren das „XIII. International Symposium on Biomineralization“ (September 2015, Granada, Spanien), die „XXI. Conference of Polish Chitin Society: New Aspects in Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives“ (September 2015, Stettin, Polen), die „12. International Conference of the European Chitin Society“ und die „13. International Conference on Chitin and Chitosan“ (beide in Münster, Deutschland), die „25. Goldschmidt Conference“ (August 2015, Prag, Tschechien), der „European Polymer Federation Congress 2015“ (Juli 2015, Dresden, Deutschland), die „Eurofillers Polymer Blends 2015“ (Juni 2015, Montpellier, Frankreich) sowie die „Advances in Cell Biology and Biotechnology“ (Oktober 2015, Lwiw, Ukraine).

Im gleichen Zeitraum erschienen 13 begutachtete Publikationen, beispielsweise in *Nature Scientific Reports*, *Nano Research* und dem *Journal of Materials Chemistry B*. Zudem erschienen zwei materialwissenschaftlich ausgerichtete Bücher zu biologisch inspirierten Materialien und Strukturen, wobei ein besonderes Augenmerk auf die biomimetischen Methoden gelegt ist (siehe Abb. 3).

Das erste Buch ist eine Monographie von Prof. Ehrlich und beschäftigt sich mit dem Ursprung der evolutionären Entwicklung sowie dem hierarchischen Aufbau verschiedener dreidimensionaler, biologischer



Abbildung 1: Mitarbeiter, Studenten und Austauschwissenschaftler der Arbeitsgruppe „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“ (von links oben nach rechts unten): Iaroslav Petrenko, Sabine Kaiser, Prof. Dr. Hermann Ehrlich, Christine Klinger, Diana Nebrich, Dr. Vasilii Bazhenov, Laura Zelencova, Malgorzata Norman, Esra Bulut, Betül Bitim, Bahar Akyüz. Nicht abgebildet: Marcin Wysokowski, Thomas Szatkowski, Izabella Zglobicka, Toni Köppe, Dmitry Karyakin und Vitalii Mutsenko.

schers Strukturen, wie Biokomposite und Biopolymere, in Wirbeltieren marinen Ursprungs. Neben der Untersuchung von vorhandenen Strukturen, ist die Entwicklung neuartiger Materialien für verschiedene Anwendungen von besonderem Interesse. Damit schließt das Buch an die 2010 erschienene erste Monographie zu biologischen Material marinen Ursprungs in wirbellosen Tieren an. Das zweite Buch, für das Prof. Ehrlich ein Kapitel vorbereitet hat, beschäftigt sich mit der Evolution stabiler Leichtbaustrukturen, wie sie beispielsweise in Kieselalgen und Radiolarien zu finden sind. Im Fokus steht dabei die Bionik und somit der Übertrag der gewonnenen Strukturkenntnisse auf technische Anwendungen.

Forschungstätigkeiten der Arbeitsgruppe

Die wesentlichen Forschungsschwerpunkte „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“ wurden 2015 intensiv weiter verfolgt, wobei der Fokus auf der



Abbildung 2: Oben: Prof. Pupa Gilbert (USA), Sabine Kaiser, Prof. Hermann Ehrlich, Prof. Steve Weiner (Israel), Andre Ehrlich während des „XIII. International Symposium on Biomineralization“ in Granada, Spanien. Mitte: Prof. Hermann Ehrlich, Dr. Vasilii Bazhenov. Unten: Iaroslav Petrenko, Marcin Wysokowski, Sabine Kaiser.

bioinspirierten Materialwissenschaft lag. Durch Anwendung der „Extremen Biomimetik“ wurden neuartige Biokomposit-Materialien hergestellt. Der Begriff „Extreme Biomimetik“ wurde 2010 von Prof. Hermann Ehrlich in die Fachrichtung eingeführt. Sie basiert auf der Metallisierung und Mineralisierung spezifischer Biomoleküle unter Bedingungen, welche in extremen biologischen Nischen wie beispielsweise an hydrothermalen Quellen (schwarzen oder weißen Rauchern), Thermalquellen oder im

Dauerfrost herrschen. Im Jahr 2015 waren Biopolymere, welche unter höheren Temperaturen (60 °C bis 400 °C) *in vitro* chemisch und thermisch stabil sind, von besonderem Interesse. Als geeignete Kandidaten kommen spezifische Biomakromoleküle von thermophilen Mikroorganismen sowie Cellulose, Ligninaus-Pflanzen und Sponginaus-Schwämme in Betracht. Ein besonderes Potential für biomimetische Synthesen besitzt Chitin, weshalb es von der Arbeitsgruppe intensiv untersucht wurde.



Abbildung 3: Cover der 2015 erschienenen Bücher.

Chitin ist ein Aminopolysaccharid und spielt eine entscheidende Rolle bei der Bildung verschiedener Skelettstrukturen in Kiesellagen, Protisten und anderen Wirbellosen, einschließlich Süßwasser- und mariner Schwämme, einigen Korallen sowie Würmern, Mollusken und Gliederfüßern. Das Biopolymer hat günstige Eigenschaften wie die biologische Abbaubarkeit, die Affinität zu Peptiden, die hervorragende Biokompatibilität und ist nicht toxisch. Zudem ist Chitin in jeglicher Form ein nachwachsender Rohstoff. Für die Arbeitsgruppe ist das Chitin aus marinen Schwämmen von besonderem Interesse, da es in Form eines faserigen, röhrenförmigen, dreidimensionalen Netzwerks vorliegt und sich aus dem Schwammkörper durch ein einfaches Verfahren isolieren lässt. Das isolierte und gereinigte Chitin ist wasserunlöslich und bis 400 °C chemisch und thermisch stabil. Zudem ist eine Oberflächenmodifikation an vorhandenen Hydroxylgruppen möglich, was die Möglichkeiten für weitere Synthesen deutlich erhöht. Eingesetzt wurde das Schwamm-Chitin in diversen hydrothermalen Synthesen um anorganisches Material direkt aus wässrigen Lösungen zu kristallisieren. Dabei kamen sowohl druckstabile Teflon-ausgekleidete Edelstahlreaktionsgefäße als auch übliche Syntheseaufbauten zum Einsatz. Weiterhin wurden Spongin aus Badeschwämmen, Chitosan und Lignin als Biopolymer untersucht. Es wurden sowohl neuartige Kompositmaterialien, z. B. Chitin-GeO₂-Komposite (photolumineszente Eigenschaften), Chitin-POSS-Komposite (hydrophobe Eigenschaften), Hematit-Spongin-Komposite und Hydroxyapatit-Chitosan-Komposite (für Implan-

tate geeignetes Material), hergestellt, als auch die Bildung natürlich vorkommender Strukturen (z. B. Silikat-Chitin-Komposite) für Forschungszwecke nachgeahmt. Fortführend wurden mit den Materialien Enzym-Immobilisierungen, Oberflächen-Metallisierungen oder elektrische und optische Messungen durchgeführt. Ziel ist es, günstige und bekannte Eigenschaften von zwei oder mehr Materialien in einem Werkstoff zu vereinen oder neue Eigenschaften der Hybridmaterialien zu entdecken. Praktische Anwendungen sollen die Hybridmaterialien in der Biosensorik, der Implantat-Herstellung, dem *Tissue Engineering*, der Enzym-Immobilisierung, der Wirkstoff-Verabreichung (*Drug Delivery*) sowie der Abwasserreinigung finden. Des Weiteren werden Adsorptionsuntersuchungen an Schwammskeletten durchgeführt (siehe Abb. 4).

2015 wurde das von der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung finanzierte Teilprojekt im Rahmen des „Biohydro-metallurgischen Zentrums für strategische Elemente (BHMZ)“ fortgeführt. Ziel ist die biomimetische Herstellung und anschließende Erforschung germaniumbasierter Biokomposite. Biomimetische Materialsynthesen können einerseits *in vitro* oder *in vivo* erfolgen. Bei der *In-vitro*-Synthese werden isolierte Biomoleküle unter Laborbedingungen eingesetzt, um neue Materialien herzustellen. Die Biomoleküle können selbst zum Produkt beitragen oder lediglich an der Reaktion beteiligt sein. Als „extrem biomimetisch“ wird eine Synthese bezeichnet, wenn Biomoleküle unter unnatürlichen Bedingungen eingesetzt werden und beispielsweise einer hohen Temperatur oder hohem Druck ausgesetzt sind. Im Gegensatz dazu wird in einer *In-vivo*-Synthese ein Material infolge der Lebenstätigkeit eines Individuums gebildet. Die Bildung von Festkörpern wird häufig auf Kenntnisse der Biomineralogie zurückgeführt. Die Individuen können dabei auch in der Natur nicht vorkommende Materialien bilden. Diese sind interessant, da die Materialien im Vergleich zu anderen Methoden unter geringerem Materialeinsatz, umweltverträglich und kostengünstig hergestellt werden können. Im BHMZ-Projekt werden beide Synthesewege für die Bildung nanostrukturierter, Germanium-basierter Biokomposite verfolgt. Die Bildung eines photolumineszierenden Chitin-GeO₂-

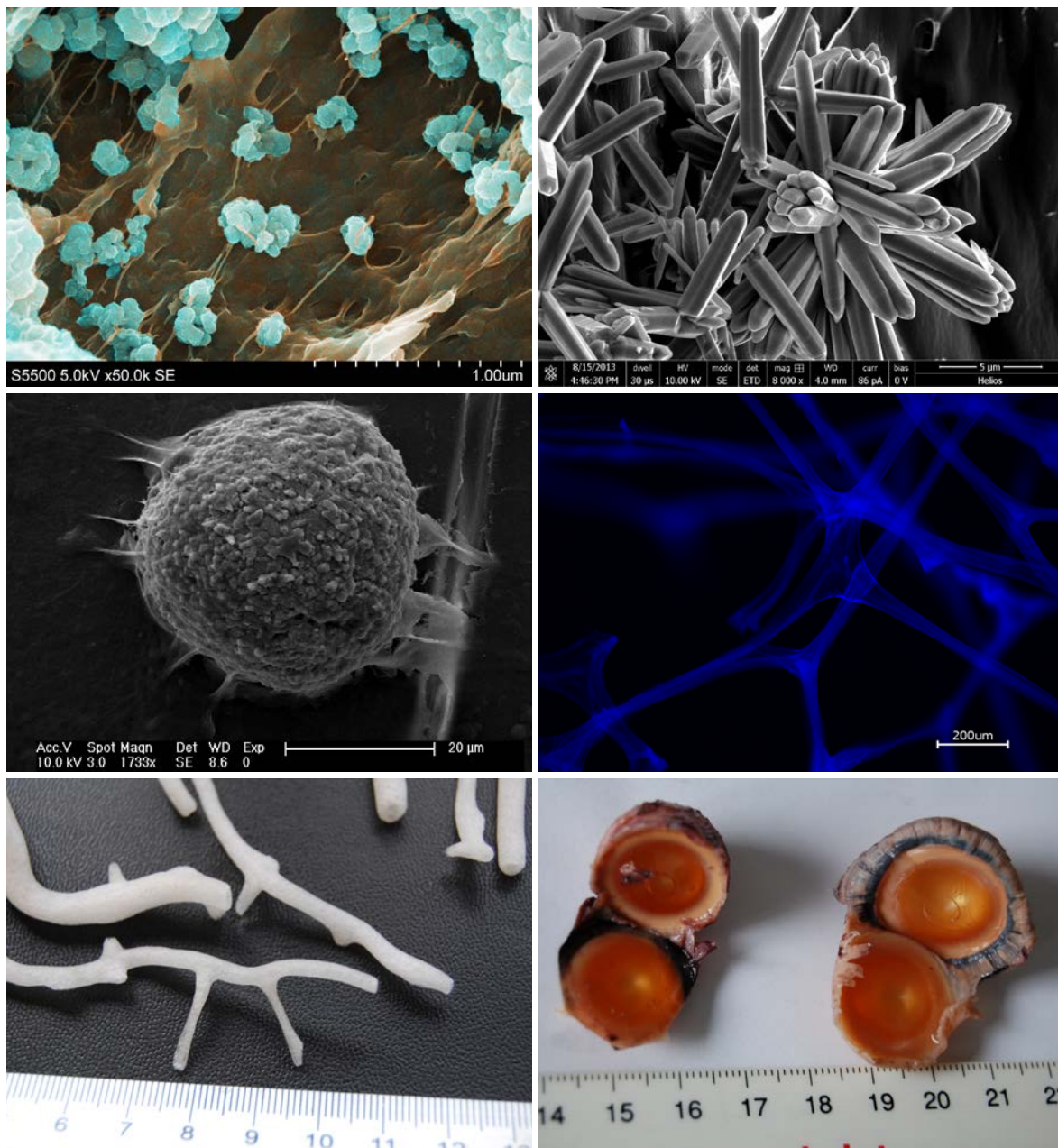


Abbildung 4: Oben links: Wachstum von Silikat-Nanopartikeln auf einer Chitin-Matrize. Oben rechts: Zinkoxid-Kristalle aufgewachsen auf einer Chitin-Membran. Mitte links: Nanostrukturiertes Hydroxylapatit-Agglomerat auf Kollagen-Gerüst. Mitte rechts: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme eines 3D-Chitin-Schwammgerüsts. Unten links: Tiefsee Glasschwamm *Caulophacus sp.* Unten rechts: Auge vom Oktopus.

Biokomposites wurde 2015 bereits in der renommierten Fachzeitschrift *Nano research* erfolgreich publiziert. Für die *In-vivo*-Synthesen werden derzeit lebende Süßwasserschwämme, Kiesellagen und Pflanzen eingesetzt.

Neben den Forschungstätigkeiten wurden von Prof. Ehrlich das Modul „Biomaterials“ mit einem Prak-

tikum für Masterstudenten angeboten und mehrere studentische Arbeiten betreut. 2015 wurde vom Chemiker Toni Köppe eine Diplomarbeit zu marinen Schwämmen angefertigt. Im September 2015 verteidigte die erste Doktorandin der Arbeitsgruppe, Izabela Zglobicka, ihre Doktorarbeit. Die Promotionsstudentin der TU Warschau promovierte zur Kieselalge *Didymosphenia geminata*. Sie erhielt

eine umfangreiche Betreuung von Prof. Ehrlich in Freiberg. Die im Wasser lebende Kieselalge *D. geminata* bildet spezielle Stiele aus, um ihren Kieselalgenkörper an ein Hartsubstrat zu binden und hebt sich damit von anderen Kiesellagenarten ab. Frau Zglobicka untersuchte die Entstehung und Zusammensetzung der Stiele sowie die Eignung dieser Stiele für die bioinspirierte Materialsynthese. Während Kiesellagen für die Bildung von biogenem Opal bekannt sind, zeigen die Untersuchungen, dass die Kieselalge *D. geminata* in ihren Stielen Nanofasern aus Polysacchariden und kristallinem Calcit aufbaut. Dadurch wird die Festigkeit der Stiele erhöht. Die Bildung dieses Mehrphasen-Komposites bei Kieselalgen wurde in der Literatur nun erstmals beschrieben. Wie sich zeigte, ist *D. geminata* in der Lage durch enzymatische Reaktionen Bioerosion am Gestein durchzuführen, um daran Kohlenstoff zu fixieren.

Die Ausgründung „BromMarin“

Im Oktober des Jahres 2015 erfolgte die Gründung der BromMarin GmbH und der Umzug des Gründungsteams in die Räumlichkeiten des Gründer- und Innovationszentrum Freiberg (GIZEF). Die Ausgründung des Projektes war zuvor über anderthalb Jahre von den drei Gründern Andre Ehrlich, Marcel Bürger und Stephan Meschke vorbereitet worden (siehe Abb. 5). Sie selbst sind Absolventen der TU Bergakademie Freiberg. Gefördert wurde die wissenschaftliche Ausgründung zunächst über das EXIST-Gründerstipendium, einem Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie sowie einem Technologiegründerstipendium, finanziert durch den Europäischen Sozialfonds (ESF). Zusätzlich gab es weitere, wichtige Unterstützung, für die an dieser Stelle gedankt wird. Stärkung erhielt das Team in Gründungsfragen vom SAXEED Gründernetzwerk Freiberg und in wissenschaftlichen Fragestellungen vom Mentor Prof. Hermann Ehrlich.



Abbildung 5: Gründerteam um Andre Ehrlich (Geschäftsführer), Stephan Meschke (Geschäftsfeldentwicklung) und Marcel Bürger (F&E).

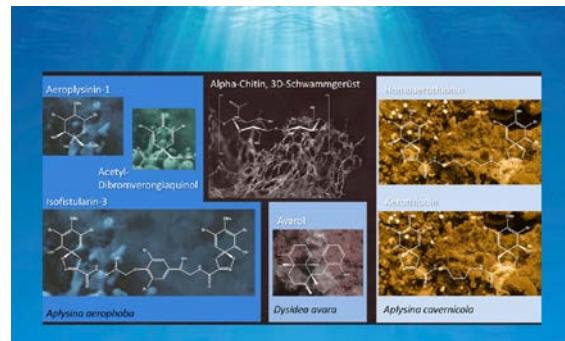


Abbildung 6: Erarbeitetes Produktportfolio der BromMarin GmbH 2015.

Ziel der BromMarin GmbH ist die Entwicklung innovativer Methoden für die marine Biotechnologie (siehe Abb. 6). Damit ist in Sachsen neben der „roten“ Biotechnologie (Medizin), der „grünen“ Biotechnologie (Landwirtschaft) und der weißen Biotechnologie (industrielle Produktionsverfahren) ein Vertreter der „blauen Biotechnologie“ hinzugekommen. Im Fokus stehen am Meeresboden festhaftende, lebende Schwämme der Ordnung *Verongida*.

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

Die Arbeitsgruppe um Prof. Serguei Molodtsov, der die Position eines wissenschaftlichen Direktors am *European X-ray Free Electron Laser* (XFEL) in Hamburg (www.xfel.eu) innehat, beschäftigt sich mit Materialwissenschaft sowohl an der TU Bergakademie Freiberg, als auch am *European XFEL* (siehe Abb. 1). In beiden Fällen wird die Ausbildung der Studenten als wesentlicher Teil der Aktivitäten erachtet. Neben der unmittelbaren Einbindung der Studenten in die Forschung wurde die Spezialvorlesungsreihe „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs)“ entwickelt, die jetzt in den Lehrplan der TU Bergakademie Freiberg aufgenommen wurde.



Abbildung 1: Beschleunigertunnel des *European XFEL* Mitte 2015.

Forschungstätigkeiten am Institut für Experimentelle Physik

Das Labor der Gruppe ist mit einem Photoemissionsspektrometer ausgestattet, das die Untersuchung der elektronischen Struktur hochentwickelter Materialien mit hoher Lateralaufklärung zulässt. Das ESCALAB 250Xi (siehe Abb. 2) von Thermo Scientific (Großbritannien) verfügt über eine Röntgenquelle mit Aluminiumanode und Monochromator. Für die Analyse isolierender oder schlecht leitender Proben ist eine Elektronenquelle zur Ladungskompensation vorhanden. Die Kombination aus Linsensystem, Halbkugelanalysator und Detektor ermöglicht sowohl Kleinbereichs-XPS als auch bildgebende Messungen. Eine Besonderheit des Spektrometers stellt die Cluster-Ionenquelle MAGCIS dar, welche nicht nur zur Erstellung von Tiefenprofilen, sondern auch zum sanften Abtrag von Oberflächenverunreinigungen genutzt werden kann. Die Gerätebedienung, Datenerfassung und Datenauswertung erfolgen über die Software Advantage.

XPS-Messungen dienen verschiedensten Fragestellungen innerhalb des IEP, insbesondere zu Energiewandler- und Energiespeichermaterialien sowie zur Untersuchung von Chitin-Kompositen der Arbeits-

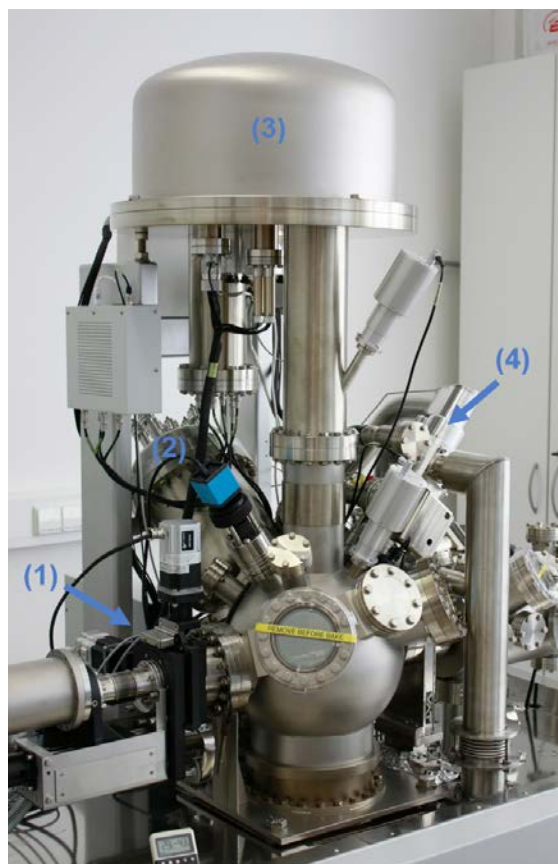


Abbildung 2: Photoelektronenspektrometer ESCALAB 250Xi von Thermo Scientific mit Al-Anode (1), Monochromator (2), Halbkugelanalysator (3) und Ionenquelle (4).

gruppe „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“ von Prof. Hermann Ehrlich. Weitere Beziehungen gibt es zum Institut für Elektronik- und Sensormaterialien (Frau Prof. Yvonne Joseph), wo für grenzflächenbestimmte Funktionsmaterialien die Zusammensetzung dünner Filme analysiert wird. Außerdem gibt es externe Kooperationen, wie mit dem Zentrum für Oberflächen- und Nanoanalytik der Johannes-Kepler-Universität Linz zur Untersuchung des Effekts von Langzeit-Argonionen- und Argonclustersputtern auf die chemische Degradation von Korrosionsprodukten wie Hydrozinkit und Eisenoxid.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“ von Prof. Hermann Ehrlich wurden Meeresschwämme mit einem mineralfreien, fasrigen Skelett aus dem Strukturprotein Spongin untersucht, welche über hydrothermale Synthese mit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ versetzt wurden. Die XPS-Analyse der Hämatit-Spongin-Verbundstruktur liefert dabei wichtige Informationen über den Bildungsmechanismus der Hämatitpartikel auf den Fasern des Schwammskeletts. Abb. 3 zeigt beispielhaft das Fe-2p-Spektrum der Hämatit-Referenzprobe und des Hämatit-Spongin-Komposites. Im Vergleich zur Hämatitprobe, welche Peaks bei 713,1 eV und 727,3 eV zeigt, sind die Peaks des Hämatit-Spongin-Verbundes breiter und zu niedrigeren Bindungsenergien verschoben, was auf eine Reduktion des Oxidationszustandes des Eisens von Fe^{3+} zu Fe^{2+} hinweist. Dies kann eventuell durch eine Reaktion des Schwefels aus dem Cystin im Spongin mit dem Hämatit entstehen.

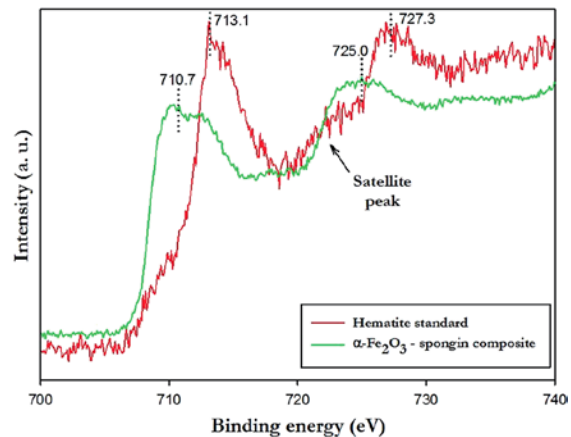


Abbildung 3: XPS-Spektrum des Fe-2p-Rumpfniveaus der Hämatit-Referenzprobe und des Hämatit-Spongin-Komposites, aus [T. Szatkowski *et al.*, RSC Advances 5 (2015) 79031].

Es wird sehr begrüßt, dass Studenten an verwandten Experimenten teilnehmen und die Möglichkeit in Betracht ziehen, hier ihre Bachelor- oder Master-Arbeit anzufertigen.

Forschungs- und Bautätigkeiten am European XFEL

In der Metropolregion Hamburg entsteht derzeit eine internationale Forschungseinrichtung der Superlative (siehe Abb. 4). Der Röntgenlaser *European XFEL* wird 27 000 Lichtblitze pro Sekunde erzeugen, mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art. Damit eröffnet er völlig neue Forschungsmöglichkeiten. Wissenschaftlerteams aus



Abbildung 4: *European XFEL* mit den drei Betriebsgeländen Schenefeld (Experimentierhalle), Osdoerfer Born sowie DESY-Bahrenfeld. Die Gesamtlänge der Anlage beträgt 3,4 km.

der ganzen Welt können am *European XFEL* Strukturen im Nanobereich, ultraschnelle Prozesse und extreme Materiezustände untersuchen. Die neue Forschungseinrichtung wird von der *European XFEL GmbH* gebaut und betrieben. Die eigenständige Gesellschaft ist gemeinnützig und kooperiert eng mit ihrem Hauptgesellschafter, dem Forschungszentrum DESY, und weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen weltweit. Das *European XFEL*-Vorhaben ist auf gutem Wege, Röntgenstrahlen ab Ende 2016 liefern zu können. Der Nutzerbetrieb wird 2017 anfangen und auch Stellvertreter der TU Bergakademie Freiberg mit ausgezeichneten Möglichkeiten ausstatten, Forschung an der vordersten Front der Wissenschaft zu betreiben.

Von der neuen Forschungseinrichtung profitieren die unterschiedlichsten naturwissenschaftlichen Gebiete, darunter Biologie, Medizin, Pharmazie, Chemie, Materialwissenschaften, Physik, Astrophysik, Energieforschung, Umweltforschung, Elektronik, Nanotechnologie und Photonik.

Freie-Elektronen-Laser weltweit

Neben dem *European XFEL* in Deutschland sind Freie-Elektronen-Laser im harten Röntgenbereich in den USA, in Japan, in Südkorea und in der Schweiz in Betrieb oder im Bau (siehe Abb. 5). Die Röntgenlaser *Linac Coherent Light Source* (LCLS) am

SLAC National Accelerator Laboratory in Kalifornien und *Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser* (SACLA) in Japan haben den Nutzerbetrieb bereits aufgenommen. Die anderen Einrichtungen werden in den kommenden Jahren folgen. Das Funktionsprinzip der FEL-Forschungsanlagen ist sehr ähnlich. Zunächst werden Elektronen auf hohe Energien beschleunigt, anschließend wird damit Röntgenlaserlicht hoher Intensität erzeugt. Während LCLS, SACLA, SwissFEL und PALXFEL konventionelle Beschleunigertechnologie einsetzen, wird der Beschleuniger des *European XFEL* bei -271 °C mit supraleitender Technologie betrieben. Die Supraleitung ermöglicht es, einen Elektronenstrahl von besonders hoher Qualität zu erzeugen, bei dem die Elektronenpakete in dichter Folge angeordnet sind. Die große Zahl der Elektronenpakete am *European XFEL* resultiert in wesentlich mehr Röntgenblitzen pro Sekunde als an den anderen Einrichtungen.

Einige Experimente werden ausschließlich am *European XFEL* möglich sein, andere können wesentlich schneller durchgeführt werden als an anderen Anlagen (siehe Abb. 6). Die hohe Zahl von Elektronenpaketen erlaubt es auch, jeweils drei der sechs Instrumente der Startphase gleichzeitig zu betreiben.

Planung und Bau der wissenschaftlichen Endstationen/Instrumente, die von den Wissenschaftlern ge-

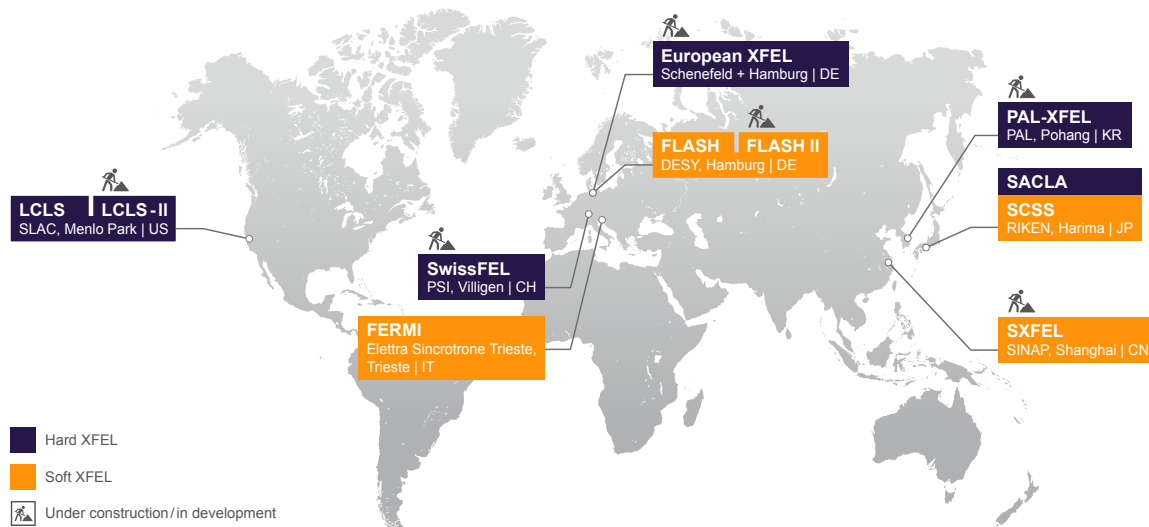


Abbildung 5: FEL-Röntgenlichtquellen weltweit. Derzeit sind LCLS in den USA und SACLA in Japan die beiden einzigen FELs, an denen Nutzer mit harter Röntgenstrahlung forschen können.

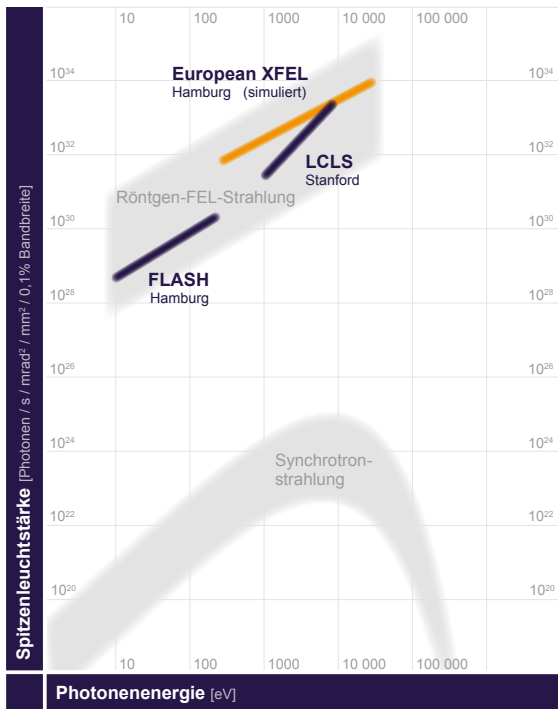


Abbildung 6: Die Spitzenleuchtstärke der Freie-Elektronen-Laser übertrifft die der meisten modernen Synchrotronstrahlungsquellen um mehrere Größenordnungen. Die Grafik zeigt den Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY, den *European XFEL* und die US-amerikanische FEL-Anlage LCLS im Vergleich mit Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation.

nutzt werden, um Experimente durchzuführen, gehen ebenfalls gut voran. Den Forschern werden sechs Instrumente zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 7), deren Schwerpunkt es ist, hauptsächlich strukturelle (harte Röntgenstrahlen) und Elektronenstrukturexperimente (weiche Röntgenstrahlen) durchzuführen:

**Harte Röntgenstrahlen:
Wissenschaftliches Instrument FXE**

Das *Femtosecond X-ray Experiments* (FXE)-Instrument wird einer breiten wissenschaftlichen Gemeinschaft zeitaufgelöste *Pump-Probe*-Experimente auf ultraschnellen Zeitskalen (100 fs und schneller) ermöglichen (siehe Abb. 8). Während die ersten Komponenten bereits hergestellt wurden, fördert die FXE-Gruppe den Entwurf der ausstehenden Komponenten durch Forschungsinitiativen, bei denen Laborlaserquellen, Synchrotronquellen in Verbindung mit dem FXE-MHz-Lasersystem und Freie-Elektronenlaser genutzt werden.

**Harte Röntgenstrahlen:
Wissenschaftliches Instrument HED**

Das *High Energy Density Science* (HED)-Instrument wird eine einzigartige Plattform für Experimente sein, die die harte Strahlung des Freie-Elektronen-Röntgenlasers mit der Möglichkeit verbinden, Materie extremen Zuständen von Druck, Temperatur oder elektrischen Feldern auszusetzen, indem optische Hochenergielaser oder gepulste Magnete genutzt werden (siehe Abb. 9). Die wissenschaftlichen Anwendungen schließen ein: Untersuchungen der Eigenschaften von Materie in Exoplaneten, neuen Extremdruckphasen und Plasmen mit festkörperartiger Dichte und strukturelle Phasenübergänge von komplexen Festkörpern in starken Magnetfeldern. 2015 wurde die Planung der Experimentierhütte und deren Infrastruktur sowie das Design der Hauptkomponenten der Beamline abgeschlossen.

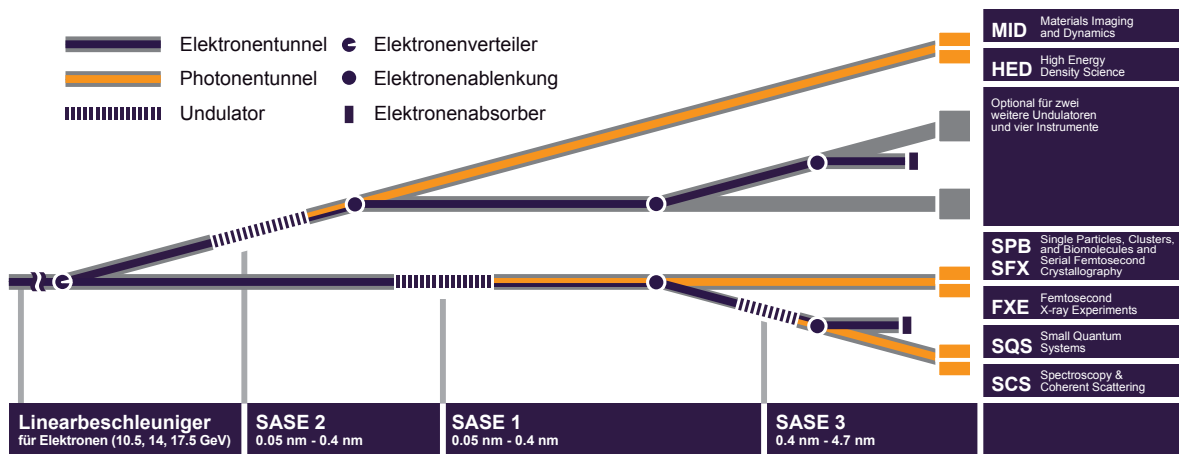


Abbildung 7: Übersicht der einzelnen Beamlines am *European XFEL*.

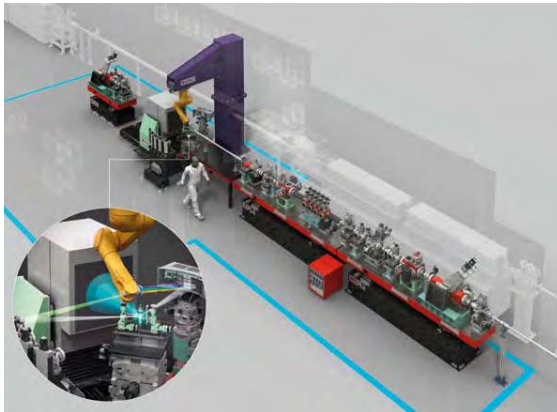


Abbildung 8: Aktueller Entwurf des FXE-Instruments.

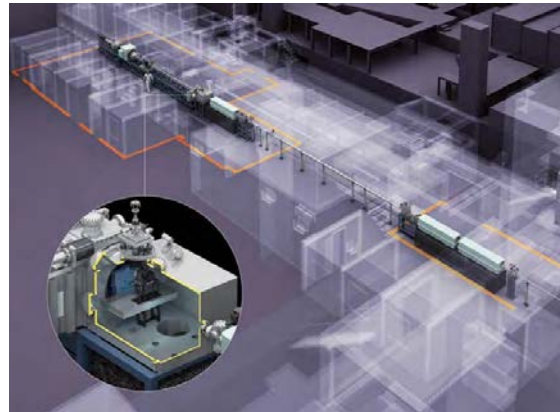


Abbildung 11: Skizze des SPB/SFX-Instrumentes.

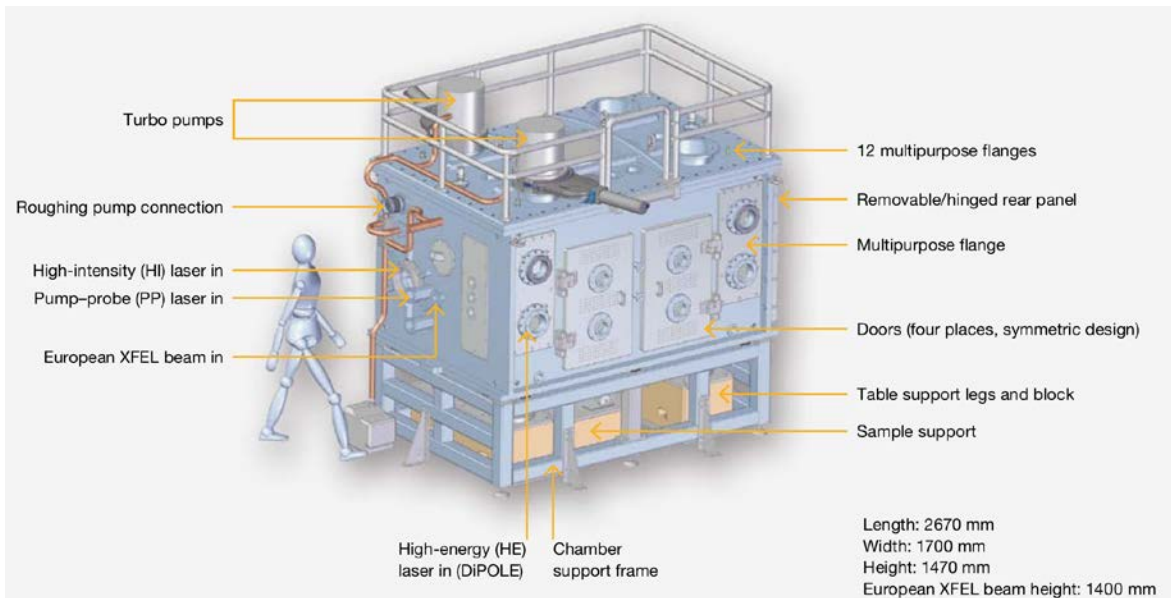


Abbildung 9: Modell der Vakuumkammer des HED-Instrumentes.

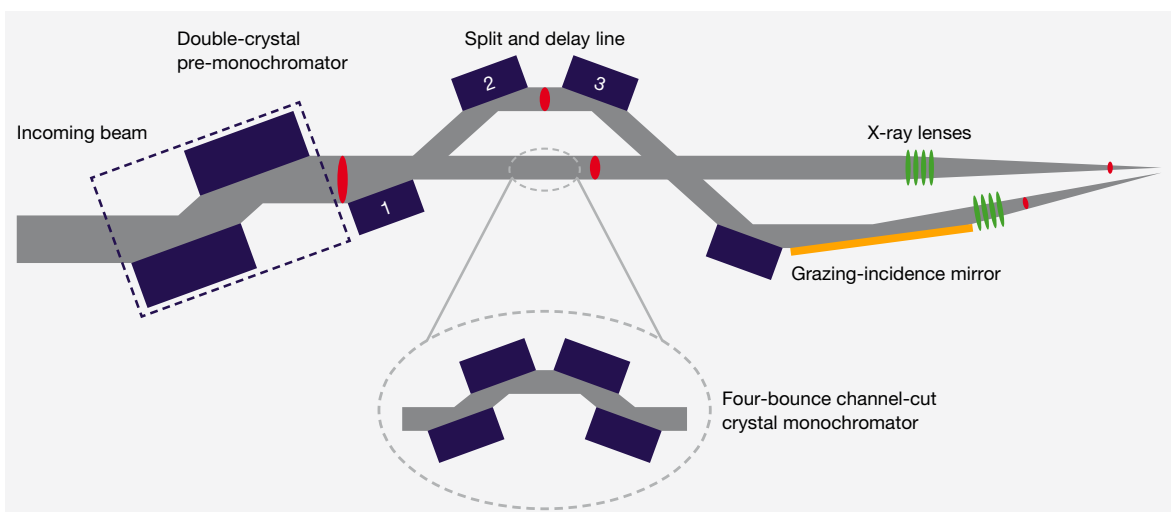


Abbildung 10: MID Split and Delay Line, welche einen Röntgenpuls in zwei gleiche Pulse aufteilt. Die Pulse treffen die Probe unter unterschiedlichen Winkeln und mit einem Zeitversatz von $\Delta t = 0-800$ ps.

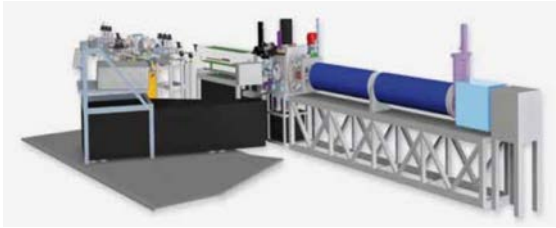


Abbildung 12: Aufbauskizze der SCS-Instrumente.

Harte Röntgenstrahlen: Wissenschaftliches Instrument MID

Das Ziel des *Materials Imaging and Dynamics* (MID)-Instruments ist es, Untersuchungen der Struktur und Dynamik von kondensierter Materie mittels Röntgenstreuung und abbildenden Experimenten auf der Nanoskala zu ermöglichen (siehe Abb. 10). Weitere Anwendungsgebiete sind Materialwissenschaft und Nanomaterialien. Die MID-Gruppe setzte die Planung verschiedener Instrumentenkomponenten, Experimentierräume und der Infrastruktur fort und führte Forschung und Entwicklung mit entsprechenden Experimenten an anderen Lichtquellen durch. 2015 konnten die technischen Designs alle Hauptkomponenten abgeschlossen werden. Des Weiteren wurden erste Teile der *Hard X-ray Split and Delay Line* produziert und erfolgreich getestet.

Harte Röntgenstrahlen: Wissenschaftliches Experiment SPB/SFX

Die *Single Particles, Clusters, and Biomolecules and Serial Femtosecond Crystallography* (SPB/SFX)-Gruppe ist dafür verantwortlich, ein wissenschaftliches Instrument für Strukturuntersuchungen von kristalliner und nicht-kristalliner Materie nach dem neuesten Stand der Technik zu bauen, insbesondere zur Bestimmung der Struktur von biologischen Molekülen (siehe Abb. 11). 2015 wurde die SPB/SFX-Gruppe vergrößert, um sicherzugehen, dass ab 2017 erste Nutzerexperimente durchgeführt werden können. Weiterhin wurden letzte Hauptbestandteile des Instrumentes bestellt, um sie so bald wie möglich zu integrieren.

Weiche Röntgenstrahlen: Wissenschaftliches Instrument SCS

Die *Spectroscopy and Coherent Scattering* (SCS)-Gruppe plant für den *European XFEL* ein Instrument

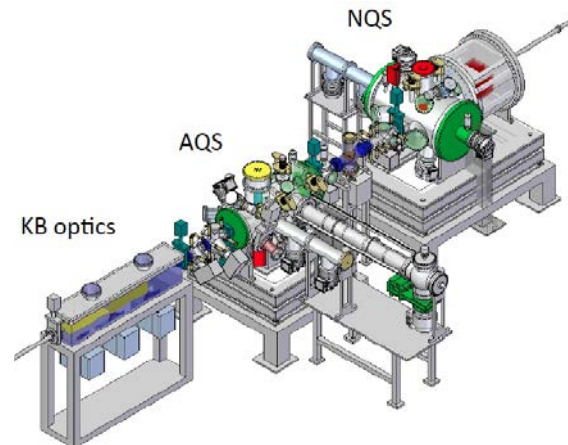


Abbildung 13: Aufbauskizze des SQS-Instruments mit den zwei Hauptkammern und den KB-Spiegeln (aus Technical Design Report TR-2012-007, Scientific Instrument SQS).

zur Kleinwinkelstreuung, Resonanzdiffraktion und kohärenten Diffraktionsabbildung bei weichen Röntgenenergien (siehe Abb. 12). Nutzer werden in der Lage sein, die elektronischen, Spin- und Struktureigenschaften von Festkörperproben in den kleinsten Raum-Zeit-Dimensionen mit einem breitgefächerten Satz von spektroskopischen Werkzeugen zu erforschen. Die SCS-Gruppe startete 2015 mit dem Aufbau der einzelnen Komponenten des Experiments, wobei einige fertig gestellt und erfolgreich getestet werden konnten.

Weiche Röntgenstrahlen: Wissenschaftliches Instrument SQS

Die *Small Quantum Systems* (SQS)-Instrumentengruppe arbeitete 2015 das finale Design der benötigten Infrastruktur des Experimentierbereiches aus sowie entwickelte einen detaillierten Plan für den Strahlengang des (optischen) Laser sowie das Design der zwei Experimentierkammern für die Untersuchung atomähnlicher Quantensysteme und nanogroßer Quantensysteme (siehe Abb. 13). Die Forschungsaktivitäten der SQS-Gruppe, die hauptsächlich Untersuchungen von nicht-linearen Prozessen in prototypischen Atomproben und auf Anwendungen von Zwei-Farb-Experimenten zur Untersuchung der Dynamik atomarer und molekularer Photoionisation gewidmet sind, basieren auf Experimenten, die an anderen Freie-Elektronen-Laserquellen durchgeführt werden.

Lehre in Hamburg

Rückblick Blockvorlesung 2015

13 Master-Studierende und Doktoranden der TU Bergakademie Freiberg waren vom 21. bis 25. September 2015 zu Gast bei *European XFEL*, einem Freie-Elektronen-Laser in Hamburg, der 2017 in Betrieb gehen wird und zu den größten neuen Forschungseinrichtungen in Europa zählt. Unter der Leitung von Prof. Serguei Molodtsov, wissenschaftlicher Direktor bei *European XFEL* und Professor an der TU Bergakademie Freiberg, nahmen die Studierenden an einem umfangreichen Wahlpflichtmodul über Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern teil. Dabei konnten sie ihre Kenntnisse zum Aufbau von Freie-Elektronen-Lasern vertiefen und sich mit Anwendungen dieser neuen Generation von Röntgenquellen vertraut machen.

Der Kurs „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern“ führte in neue Forschungsgebiete ein, die Freie-Elektronen-Laser eröffnen. Zu den von *European XFEL*-Wissenschaftlern mit viel Begeisterung und vielen interessanten Details vorgestellten wichtigen Themen auf diesem Gebiet zählten das „Filmen“ von chemischen Reaktionen, das wichtige Erkenntnisse zu zahlreichen industriellen Prozessen liefern kann, Forschung, die tiefe Einblicke in biologische Strukturen ermöglicht, spektroskopische Untersuchungen zum Magnetismus und viele mehr. Später haben die Studierenden den Kurs mit einer Prüfung zu den Grundlagen der Forschung mit Freie-Elektronen-Lasern abgeschlossen.

Im Rahmen der Blockvorlesung besuchten die Studierenden auch die Baustelle des *European XFEL* in Schenefeld (siehe Abb. 14), die DESY-Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle PETRA III und den weltweit ersten Freie-Elektronen-Laser FLASH, ebenfalls bei DESY.

Ankündigung Blockvorlesung 2016

Die nächste Blockvorlesung „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs)“ ist vom 25. bis 30. September 2016 in Hamburg geplant (siehe Abb. 15). Die Vorlesungsreihe zeigt die Darstellung von konventionellen und ultrahoch-zeitaufgelösten



Abbildung 14: 13 Doktoranden und Master-Studierende der TU Bergakademie Freiberg absolvierten eine einwöchige Blockvorlesung bei *European XFEL*.

spektroskopischen Methoden und Methoden zur Bestimmung der strukturellen Eigenschaften:

- Inelastische und resonante inelastische Röntgenstreuung,
- Röntgenemissionsspektroskopie,
- Röntgenabsorptionsspektroskopie,
- Photoelektronenspektroskopie,
- Röntgenmikroskopie,
- Kohärente Röntgendiffraktion,
- Photonenkorrelationsspektroskopie,
- Röntgenholographie.

Die Anwendung der genannten Methoden wird während den Führungen durch den weltweiten Freie-Elektronen-Röntgenlaser FLASH bei DESY illustriert. Es wird außerdem einen Besuch der Baustellen des *European XFEL* geben. Die Studierenden erlangen vertiefte Kenntnisse des Aufbaus und der Anwendung der neuesten Generation von Röntgenlichtquellen, den Freie-Elektronen-Röntgenlasern.

Die Studierenden lernen Messmethoden kennen, bei denen ultrakurze Laserlichtblitze im Röntgenbereich bis zu hunderttausendmal in der Sekunde und mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist, als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art, eingesetzt werden. Freie-Elektronen-Röntgenlaser werden in der Materialforschung und -entwicklung von katalytischen, magnetischen sowie biologischen Stoffen und Hybrid-Strukturen benutzt. Verschiedene experimentelle Methoden und ihre besonderen Möglichkeiten, die nur mit



Abbildung 15: Ankündigung der Blockvorlesung 2016 am DESY in Hamburg.

Freie-Elektronen-Röntgenlasern realisiert werden können, werden dargestellt und detailliert erläutert. Die Studierenden sollen mithilfe des Moduls in die Lage versetzt werden, die hier kennengelernten Methoden im späteren Berufsleben bei Bedarf mit zu berücksichtigen, und gleichzeitig erste Erfahrungen in einer internationalen Großforschungseinrichtung sammeln.

Unterbringung im DESY-Gästehaus, Fahrt- und Übernachtungskosten werden vom Projekt MESIOR („Maßnahmen für erfolgreiches Studieren an einer international orientierten Ressourcenuniversität“, Förderkennzeichen 01PL11092) übernommen.

Die Studenten können sich gerne anmelden bei: friedrich.roth@physik.tu-freiberg.de

Transnational Scientific and Education UniFEL Center for Advanced Methods of Material Research

Das internationale Wissenschafts- und Bildungszentrum UniFEL für neuartige Methoden der Materialforschung (*Transnational Scientific and Education UniFEL Center for Advanced Methods of Material Research*) wurde 2015 an der ITMO Universität in St. Petersburg, Russland gegründet. Das Hauptziel des *UniFEL Center* liegt in der Vorbereitung und Präparation von Experimenten an Freie-Elektronen-Röntgenlaser, vor allem am *European XFEL* in

Hamburg. Weiterhin steht die (Weiter-)Entwicklung von neuen Forschungsmethoden mit hoher Orts-, Energie- und Zeitauflösung zur Untersuchung der strukturellen sowie funktionellen Eigenschaften von Nanoobjekten im Fokus.

Ein Kooperationsabkommen zwischen der ITMO Universität und der TU Bergakademie Freiberg wurde mit dem Ziel abgeschlossen, einerseits gemeinschaftlich zukünftige Experimente an XFELs vorzubereiten und durchzuführen, sowie andererseits ein bilaterales Ausbildungsprogramm anzubieten. Das *UniFEL Center* wird von Prof. Alexey Romanov (ITMO Universität) und Prof. Serguei Molodtsov (TU Bergakademie Freiberg, *European XFEL*) geführt. Zusätzlich werden Studien zur Untersuchung der strukturellen Eigenschaften von Nanoobjekten in einer engen Kooperation mit dem *Joint Research Center (JRC) „Materials Science and Diagnostics in Advanced Technologies“* (Ioffe Institut, St. Petersburg) realisiert.

Im Rahmen der Aktivitäten des *UniFEL Centers* sind folgende Kernkompetenzen von besonderer Bedeutung:

- Charakterisierung und Erfassung der physikalischen und chemischen Parameter während der verschiedenen Entwicklungs- und Produktionsschritte von Nanostrukturen sowie Nanoobjekten

- (Element-, Phasen- und chemische Zusammensetzung; Parameter des realen Kristalls; elektronische Eigenschaften, Defektstrukturen),
- Erfassung der atomaren Struktur, der geometrischen Größe/Form wie auch der elektronischen Struktur basierend auf Messungen der Interaktion von Nanoobjekten mit Elektronen und Röntgenlicht,
 - Untersuchung der dynamischen Prozesse in Festkörpern sowie an deren Oberflächen mit hoher zeitlicher Auflösung,
 - Organisation von internationalen Ausbildungsprogrammen.

Für weitere Information siehe: <http://unifel.ifmo.ru>

Arbeitsgruppe Jun.-Prof. Roman Gumeniuk „Kristallphysik“

Im Oktober 2014 wurde Dr. Roman Gumeniuk als Juniorprofessur für Kristallphysik mit *Tenure-Track* als Nachfolger von Prof. H.-J. Möller berufen. Sein bisher ausgewiesener Schwerpunkt liegt auf Struktur-Eigenschaft-Korrelationen in intermetallischen Verbindungen. Durch diese Berufung wird die interdisziplinäre Ausrichtung der Professuren des Instituts verstärkt und die Basis für eine auch künftig enge Zusammenarbeit innerhalb des Hauses gelegt.

Pyrit als thermoelektrisches Abwärmerückgewinnungssystem

Technologien, welche die Entstehung von Ozon, die Emission von Treibhausgasen und die Verwendung fossiler Brennstoffe reduzieren, spielen immer wichtigere Rollen in unserem Alltag. Thermoelektrische (TE) Generatoren (TEG) sind Halbleitersysteme, die Abwärme in elektrische Energie umwandeln. Die TE-Stromerzeugung beruht auf dem Seebeck-Effekt (1821). In Abb. 1 ist ein thermoelektrisches Modul dargestellt. Wird die obere Anschlussstelle des p/n-Überganges aufgewärmt und die untere abgekühlt (womit ein Temperaturgradient erzeugt wird), entstehen Elektron/Loch-Paare am warmen Ende des Systems. Sie absorbieren die Wärme, geben sie am kalten Teil des Moduls ab und rekombinieren dabei. Ein Spannungspotenzial (Seebeckspannung), das den Loch-/Elektronenfluss treibt, entsteht durch die Temperaturdifferenz zwischen den heißen und kalten Enden des TE-Moduls.

Festkörperenergieumwandlung hat ein großes technologisches Potenzial hinsichtlich ihrer Einfachheit im Vergleich zu Systemen, die zweiphasige Arbeitsfluide (Gas/Flüssigkeit) komprimieren und expandieren müssen. Der Vorteil von TEG gegenüber herkömmlichen Systemen basiert auf ihren kleinen Dimensionen, ihrer Robustheit und den kurzen Reaktionszeiten. Zwei wichtige Wege führen zur erfolgreichen Anwendungen der TEG:

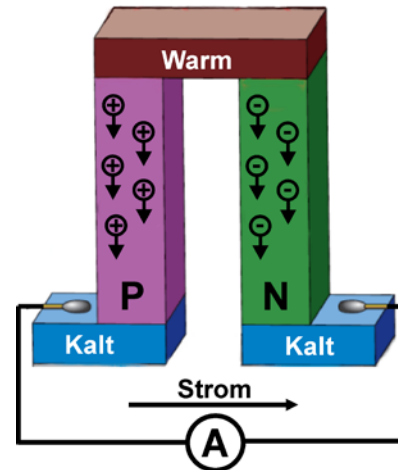


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines thermoelektrischen Moduls zur Stromerzeugung (Seebeck-Effekt) [7].

- die Verbesserung der intrinsischen Effizienz von TE-Materialien und
- ihre Einsatzoptimierung [1].

Die Leistung eines TE-Materials wird durch einen dimensionslosen Gütefaktor

$$zT = S^2 T / \rho \kappa$$

beschrieben, wobei S , ρ , κ und T die Thermokraft, der elektrische Widerstand, die Wärmeleitfähigkeit und die absolute Temperatur sind. Prinzipiell gibt es keine theoretische Obergrenze für zT . Allerdings gibt es bis jetzt keine bekannten TE-Materialien, die einen Gütefaktor $zT > 3$ aufweisen [2]. Die Definition des Gütefaktors bedeutet, dass ein Material mit einem hohen zT zu finden eine Herausforderung darstellt, da sich hohe Thermokraft, gute elektrische und schlechte Wärmeleitfähigkeit sehr schwer gleichzeitig erfüllen lassen. Dotierte Isolatoren zeigen oft hohe Thermokraft, hohe elektrische Leitfähigkeit wiederum liegt in Metallen vor. Eine hohe elektrische Leitfähigkeit mit einer gleichzeitig geringen Wärmeleitfähigkeit impliziert aber eine schwache Elektronenstreuung und starke Phononenstreuung. Das für industrielle Zwecke meist verwendete TE-Material ist Bi_2Te_3 .

Besonderes Augenmerk gilt der Tatsache, dass die TE-Materialien für eine potentielle industrielle Anwendung einen hohen Schmelzpunkt besitzen sollten, sie sollten im Betriebstemperaturbereich strukturell stabil sein, leicht herstellbar sein und zusätzlich sollten die Bestandteile der Materialien ausreichend verbreitet und vor allem billig sein. In dieser Hinsicht sind TE-Materialien, die teure Elemente wie Tellur, Seltene Erden und Edelmetalle erhalten, nicht die besten Kandidaten für den allgemeinen Gebrauch. In diesem Zusammenhang steigt heutzutage das Interesse an weit verbreiteten, billigen, schwefelhaltigen, natürlichen und künstlich erzeugten Mineralien. Die jüngsten Untersuchungen zeigen, dass unerwartet hohe zT -Werte auch bei einfachem Galenit (PbS , $zT = 0,3$ bei 600 °C [3]), Chalkosin (Cu_{2-x}S , $zT = 1,6$ bei 700 °C [4]) oder modifiziertem Tetraedrit ($\text{Cu}_{12-x}\text{M}_x\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, $zT = 0,9$ bei 400 °C [5]) erreicht werden können. Unsere Untersuchungen zeigen, dass zT -Werte in natürlichen Pyriten (NP) um einen Faktor 5–10 besser ($zT = 3 \cdot 10^{-3}$ bei 500 K) als in synthetischen FeS_2 ($zT = 10^{-4}$ bei 500 K [6]) sind (siehe Abb. 2). Höhere zT -Werte werden durch die Erhöhung der Thermokraft in NP um den Faktor 2–3 sowie niedrigere elektrische Widerstände ($\rho = 10^{-6}$ – $10^{-4}\ \Omega\text{m}$ ist typisch metallisch) erreicht. Dabei zeigt die Wärmeleitfähigkeit in natürlichen Pyriten (20 – $30\ \text{W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ bei RT) aber metallisches Verhalten, was schlecht für eine potentielle TE-Anwendung ist. Die zT -Werte sind daher auch viel kleiner als die gewünschten, die bei 1–2 liegen sollten. Röntgen-

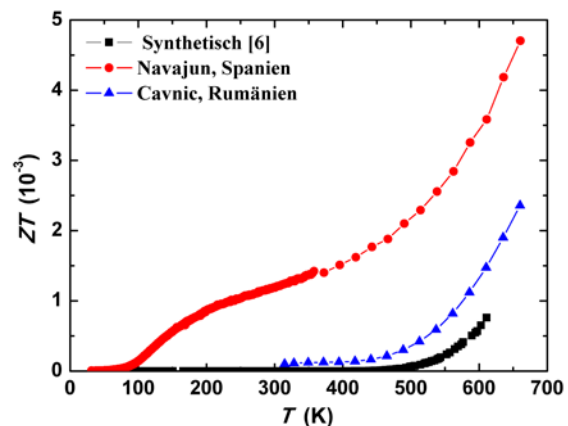


Abbildung 2: zT -Werte in Abhängigkeit von der Temperatur für synthetisches FeS_2 und natürliche Pyrite aus verschiedenen Lagerstätten.

strukturanalyse zusammen mit chemischer Analyse und EDX-Mapping (siehe Abb. 3) haben gezeigt, dass NP mit Sauerstoff (bis 3 Gew.-%), Ti, Al, Si (alle bis 0,1 Gew.-%) und TiO_2 verunreinigt sind. Die Verunreinigungen verursachen offensichtlich die Erhöhung der zT -Werte in NP, allerdings sind die dahinterstehenden Mechanismen bis jetzt unklar. Wir sind dabei, die Mechanismen der Erhöhung der TE-Effizienz in natürlich vorkommenden Pyriten im Vergleich zum synthetischen FeS_2 zu klären. Anhand dieser Ergebnisse sollen natürliche Mineralien bzw. synthetisches FeS_2 chemisch modifiziert bzw. mit entsprechenden Nebenphasen (z. B. TiO_2) so dotiert werden, dass $zT = 0,3$ – $0,6$ erreicht wird.

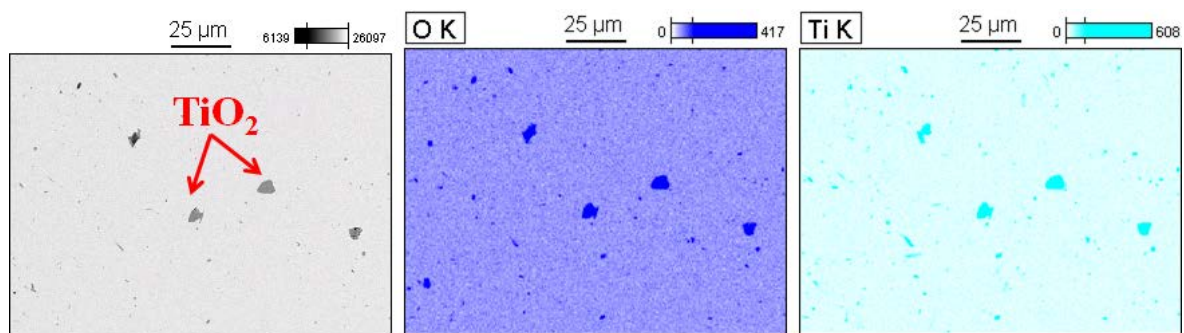


Abbildung 3: REM-Bild (links) und EDX-Mappings für Sauerstoff (Mitte) und Titan (rechts) von natürlichem Pyrit aus Navajun, Spanien.

Referenzen

- 1 L. E. Bell, *Science* 321 (2008) 1457.
- 2 T. M. Tritt, M. A. Subramanian, *MRS Bulletin* 31 (2006) 188.
- 3 L.-D. Zhao, J. He, S. Hao, C. Wu, T. P. Hogan, C. Wolverton, V. P. Dravid, M. G. Kanatzidis, *J. Am. Chem. Soc.* 134 (2012) 16327.
- 4 Y. He, T. Day, T. Zhang, H. Liu, X. Shi, L. Chen, G. J. Snyder, *Adv. Mater.* 26 (2014) 3974.
- 5 X. Lu, D. T. Morelli, Y. Xia, F. Zhou, V. Ozolins, H. Chi, X. Zhou, C. Uher, *Adv. Energy Mater.* 3 (2013) 342.
- 6 T. Harada, *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 (1998) 1352.
- 7 J.-F. Li, W.-S. Liu, L.-D. Zhao, M. Zhao, *Asia Mater.* 2 (2010) 152.

Gast-Professor Ingo A. Schwirtlich

„Photovoltaik: Modultechnik und Modulmaterialien“

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

Die Herstellung von Photovoltaik-Modulen durch Bildung eines Sandwich-Laminates, das neben den Solarzellen aus einer Frontglasscheibe, Einkapselungsmaterialien sowie einer Folien- oder Glasrückseite 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, UV-Strahlung und die anliegenden elektrischen Potentiale, ergeben sich eine große Zahl von Wechselwirkungen, die diese Produkte im Einsatz erfahren.

Deutschland verfügt mit ca. 40 GW installierter Leistung über eine hohe Anzahl an Photovoltaik Bestandsanlagen, von denen man eine Lebensdauer von über 20 Jahren erwartet. Dies setzt voraus, dass man die zu erwartenden Wechselwirkungen in den einzelnen 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 SolarValley Mitteldeutschland, der TU Bergakademie

Freiberg und dem Fraunhofer THM in Freiberg wurde von der CEM Concept GmbH, eine vom BMFT geförderte Studie [1] über dieses Thema durchgeführt, deren wesentliche Erkenntnisse auch in eine Wahlpflichtvorlesung eingehen.

Die Ergebnisse sowie weitere Schlussfolgerungen daraus wurden im Rahmen der PV-Days organisiert vom FhG-CSP Halle am 21./22.10.2014 vorgestellt [2] und diskutiert.

Solarzellen, die innerhalb der Solarmodule von der „Potential-induzierten Degradation“ betroffen sind, können mittels Elektrolumineszenz-Aufnahmen oder wegen ihrer erhöhten Betriebstemperatur mithilfe von Infrarot-Kameras erkannt werden. Um betroffene Module in einer Freifeldanlage identifizieren zu können, wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer THM die Flugthermographie entwickelt, bei der mithilfe kleiner Flugdrohnen, in diesem Fall mittels Oktokoptern, deren Software durch die CEM Concept GmbH weiterentwickelt wurde, Infrarot-

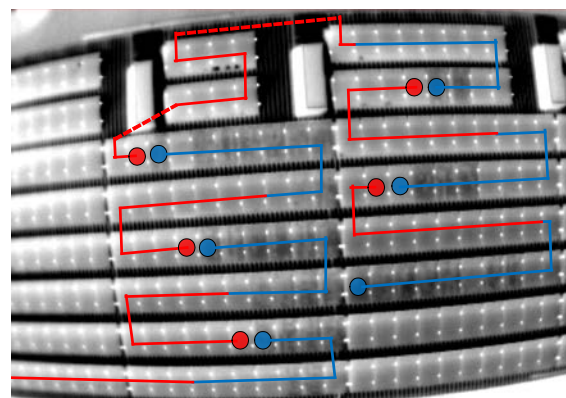


Abbildung 1: Flugthermographie-Aufnahme der PV-Anlage auf dem Gebäude des Fraunhofer THM in Freiberg mithilfe einer Mikrodrohne. Die dunklen Stellen sind Modulbereiche erhöhter Temperatur infolge der Potential-induzierten Degradation. Wie aus der eingezeichneten Verschaltung zu erkennen ist, tritt dieser Effekt bei p-Typ-Solarzellen ausschließlich im Bereich des Minuspols (blau) der Verschaltung auf. Die Darstellung entstammt dem Vortrag von Herrn Dr. Thomas Kaden, FhG-THM, den er im Rahmen des Workshops gehalten hat [3].

aufnahmen von installierten Photovoltaikanlagen angefertigt werden.

Zur Förderung der Anwendungen ziviler Mikro-Drohnen im Bereich der Wissenschaft und Technik wurde von der TU Bergakademie zusammen mit dem Fraunhofer THM am 23./24. April 2015 ein Workshop in Freiberg organisiert. In den Vorträgen wurden neben der Flugthermographie unterschiedliche Einsatzgebiete von Drohnen, unter anderem auch zur Erkundung und Vermessung von Gängen in Bergwerken, vorgestellt und diskutiert. Die Veranstaltung fand mit über 50 Teilnehmern großes Interesse und soll in einem überschaubaren Zeitraum ihre Fortsetzung finden.

Referenzen

- 1 Die Studie wurde von CEM Concept GmbH als Aufgabe M 670 des Unterprojektes μ -Module, Phase 2, „Potential Induced Degradation“ des Fraunhofer THM in Freiberg, unterstützt von SolarValley Mitteldeutschland und gefördert durch das BMBF, Förderkennzeichen 03SF0400B, durchgeführt.
- 2 Ingo Schwirtlich, PID-Figured out, PV-Days am FhG-CSP Halle, 21./22.10.2014.
- 3 Thomas Kaden, Flugthermographie einer Aufdach-Anlage mit PID geschädigten Modulen, Workshop: Anwendungen ziviler Mikro-Drohnen, 23./24.04.2015, FhG-THM Freiberg.

Methodisches Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien

Das Methodische Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien (MKEM) wurde im Rahmen der Sächsischen Landesexzellenzinitiative „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch atomares Design und Defekt-Engineering“ (ADDE) im Jahr 2009 gegründet. Organisatorisch wurde das MKEM an die Institute Experimentelle Physik und Elektronik- und Sensormaterialien angegliedert. Highlights der Forschung in ADDE sind im November 2015 in einem Buch erschienen (siehe Abb. 1).

Seit Ablauf der Projektzeit der Landesexzellenzinitiative im Februar 2014 wird das MKEM im Rahmen des BMWI-Verbundprojektes BaSta als eigene Einheit im Institut für Experimentelle Physik fortgeführt. Seit dem Beginn in 2009 leitet Frau Dr. Barbara Abendroth das MKEM. Aufgaben, die sie als Leiterin des MKEM wahrnimmt, sind zum einen die Laborleitung des ZRL sowie die Vertretung des IEP im Leitungsgremium des Zentralen Reinraumlabor (ZRL). Zum anderen ist Frau Abendroth sowohl für das IEP als auch das ZRL Ansprechpartner für interne und externe Kooperationspartner.

Innerhalb der TU Bergakademie Freiberg koordiniert das MKEM den Zugang zu den Anlagen des Zentralen Reinraumlabor (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 (insbesondere im ZRL) und potenziellen Nutzern.

Das Zentrale Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg

Das Zentrale Reinraumlabor wird an der TU Bergakademie Freiberg gemeinschaftlich von den Instituten Elektronik- und Sensormaterialien, Experimentelle Physik und Angewandte Physik betrieben. Die Direktoren dieser Institute Prof. Yvonne Joseph, Prof. Dirk C. Meyer und Prof. Johannes Heitmann bilden

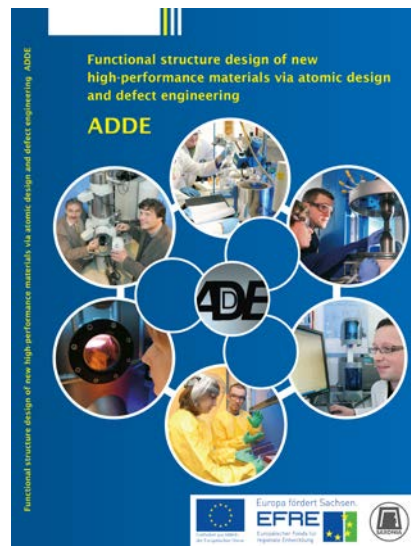


Abbildung 1: Cover des ADDE-Buches: „Functional structure design of new high-performance materials via atomic design and defect engineering“, ISBN 978-3-934409-68-2.

zusammen mit der Leiterin des MKEM Dr. Barbara Abendroth das wissenschaftliche Leitungsgremium. Der Reinraum verfügt über 300 m² Reinraumfläche in den Klassen 5-7 (ISO EN DIN 14644). Alle relevanten Halbleiter-Fertigungsprozesse zur Herstellung von Teststrukturen stehen hier für die Materialentwicklung und Materialphysik zur Verfügung.

Neben den Forschungsarbeiten ist die studentische Ausbildung ein wichtiger Schwerpunkt des ZRL. Alle Studenten der Vertiefungsrichtung Festkörperphysik der Angewandten Naturwissenschaft, sowie die Studenten der Elektronik- und Sensormaterialien und Photovoltaik und Halbleitertechnik absolvieren ein Praktikum in diesem Labor. Das MKEM betreut zahlreiche Graduierungsarbeiten, während derer Studenten praktische Erfahrungen im Reinraum sammeln. Gerne nutzen auch Schülergruppen die Möglichkeit sich das Arbeitsumfeld in einem Reinraum anzuschauen. Dieses Angebot des MKEM wird regelmäßig von sächsischen Schulen wahrgenommen und überregional auch im Rahmen des alljährlichen Girlsday gerne angenommen. Im vergangenen Jahr „öffnete“ das ZRL anlässlich des 500jährigen Bestehens des Freiburger Geschwister-



Abbildung 2: Schüler des Freiburger Geschwister-Scholl-Gymnasiums besuchten am 8. Oktober 2015 das Zentrale Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg.

Scholl-Gymnasiums seine Türen für die Schüler der Sekundarstufe II. Impressionen von diesem Tag sind in der Abbildung 2 gezeigt: Hier sind die Schüler in der Nasschemie mit Arbeitsschutzausrüstung für das Ätzen der Metallisierung und in der Litographie bei der Auswertung der von Ihnen hergestellten Strukturen gezeigt.

Für die Prozessierung von dünnen Schichten, Teststrukturen und mikroelektronischen Bauelementen stellt das ZRL die Grundtechnologien der modernen Halbleiterfertigung zur Verfügung. Die vorhandene Prozesstechnik basiert auf der Verarbeitung von 6-Zoll-Siliziumwafern, jedoch sind unterschiedliche kleinere Substratgrößen ebenso etabliert. Die Prozesskette umfasst die Nasschemische Reinigung, thermische Oxidation, Abscheidung funktionaler Schichten sowie der Metallisierung. Zur Strukturierung werden optische Lithographie, *Lift-off*-Verfahren sowie nasschemisches und trockenchemisches Ätzen verwendet.

Reaktives Ionenätzen

Durch die Professur Verbindungshalbleiter und Spektroskopie konnte bereits im Jahr 2013 eine Plasmaätz-Clusteranlage zum Trockenätzen mit Fluor- und Chlor-haltigen Ionen in Betrieb genommen werden (siehe Abb. 3). Nach der Installation der notwendigen Sicherheitssensorik konnte die Anlage in 2015 auch den Betrieb mit den Gasen HBr, SF₆

oder BCl₃ aufnehmen. Neben der Strukturierung von Übergangsmetalloxiden in reaktiven SF₆/Ar oder CF₄/Ar induktiv gekoppelten Plasmen stehen nun auch Ätzprozesse wie BCl₃/Cl₂/N₂ für Metalle (Ti, Al), SF₆/Ar für Si, BCl₃/Cl₂/N₂ für Al₂O₃ und GaN zur Verfügung (siehe Abb. 4).

Zur Überwachung der Ätzraten und Bestimmung des Endpunktes ist die Anlage mit einem Laser-Interferometer ausgerüstet. Plasmaparameter wie die Gastemperatur oder Dissoziations- und Ionisierungsgrad können optisch über die charakteristischen Emissionslinien angeregter neutraler und ionisierter Spezies analysiert werden.



Abbildung 3: Plasmaätz-Clusteranlage mit zwei Kammern mit induktiv gekoppelten Plasmaquellen für das Trockenätzen. Plasmaätzen mit fluor- und chlorhaltigen Gasen wird jeweils getrennt in einer dedizierten Kammer durchgeführt.

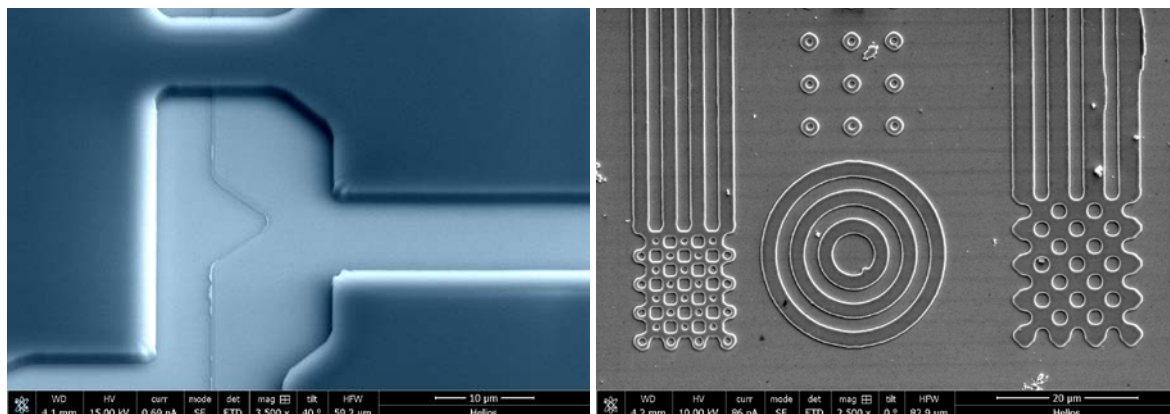


Abbildung 4: Mesa-Ätzstrukturen auf einem Siliziumwafer zum Testen des lateralen Auflösungsvermögens der Lithographie und des Ätzprozesses.

Virtuelles Institut MEMRIOX

Im Virtuellen Institut „Memristive effects in ion beam modified oxides“ (VI MEMRIOX, Förderkennzeichen: VH-VI-442) untersucht das MKEM den Einfluss der atomaren Nah- und Fernordnung auf das resistive Schalten im Stoffsystem $\text{SrTiO}_3\text{-TiO}_2$. Titandioxid und Strontiumtitanat sind hierfür jeweils Modellsysteme für binäre bzw. ternäre Übergangsmetalloxide.

Die Nahordnung kann dabei durch Stöchiometrievariationen eingestellt (z. B. in ternären amorphen SrO-TiO_2 -Schichten) oder durch Ionenimplantation mit kontrollierter Intensität in einer ganz bestimm-

ten Tiefe der Schicht gestört werden. Beide Ansätze werden im binären Titandioxid und im ternären System SrTiO_3 untersucht. Die Atomlagenabscheidung bietet hierbei die Möglichkeit Kationenzusammensetzungen weit außerhalb der thermodynamischen Gleichgewichtszusammensetzung herzustellen. Damit können die elektrischen und optischen Eigenschaften der ALD-Dielektrika zwischen den Werten von TiO_2 , SrTiO_3 und SrO variiert werden. Abbildung 6 zeigt den Verlauf des Brechungsindex und der optischen Bandlücke für ternäre Oxidschichten mit Sr/Ti -Kationenverhältnissen von 0,2 bis 2,75 (siehe auch den Bericht zum Projekt).

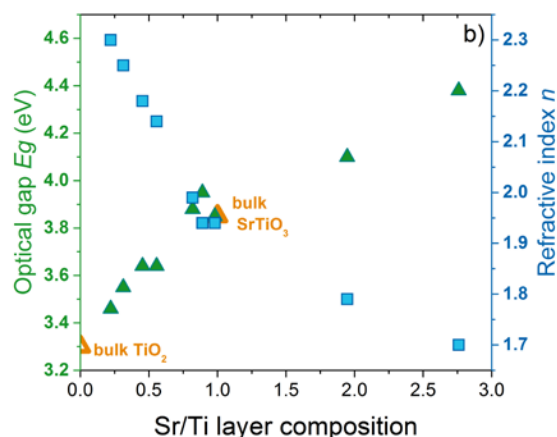


Abbildung 5: Über die Kationenzusammensetzung in $\text{Sr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2$ wird die dielektrische Funktion des Oxides eingestellt. Gezeigt sind der Wert der optischen Bandlücke und der Brechungsindex im sichtbaren Spektralbereich für verschiedene Sr/Ti -Verhältnisse.

Kooperation mit den MEMRIOX-Projektpartnern

Multiferroisches YMnO_3 wird in der MEMRIOX-Gruppe der TU Chemnitz mit Hinblick auf Mechanismen des Widerstandsschaltens untersucht. Auch für photosensorische Anwendungen kann die ferroelektrische permanente Polarisation der YMnO_3 -Struktur (Perowskit-Typ) genutzt werden.

Das MKEM ist an diesen Arbeiten, vor allem an röntgenographischen Strukturuntersuchungen der YMnO_3 -Schichten, beteiligt. Abbildung 6 zeigt Daten aus einer 2016 erschienenen Veröffentlichung der Arbeitsgruppe von Heidemarie Schmidt (TU Chemnitz) zu der das MKEM mit Röntgenbeugungsmessungen beigetragen hat. Die Abbildung zeigt

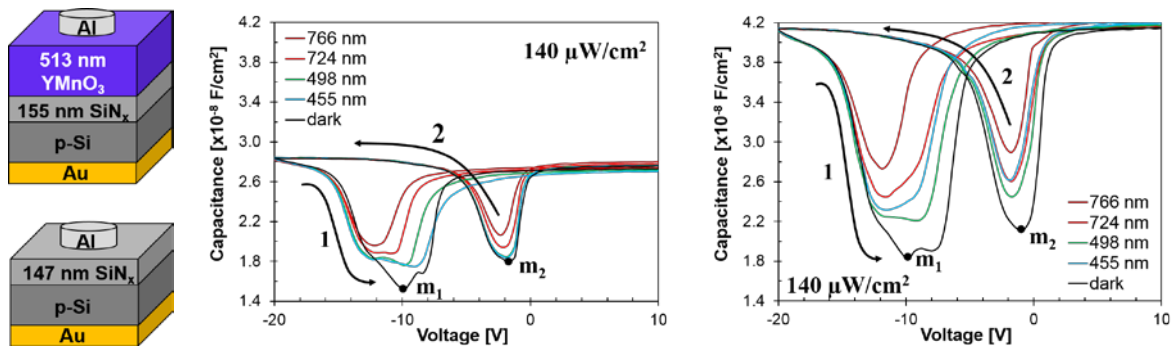


Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines kapazitiven MFIS-Photodetektors und einer MIS-Vergleichsstruktur ohne Ferroelektrikum sowie die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien des Detektors unter monochromatischer Beleuchtung verschiedener Wellenlänge.

den prinzipiellen Aufbau einer Metall-Ferroelektrikum-Isolator-Halbleiter (MFIS) Struktur, die als photokapazitives Element eingesetzt werden kann, sowie die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien des Detektors unter monochromatischer Beleuchtung verschiedener Wellenlänge. Vorteil der MFIS-Struktur ist die höhere Retention der Photokapazität im Vergleich zu einer einfachen MIS-Struktur. Ursache ist ein *Pinning* von Ladungen an der Grenzfläche YMnO₃/SiN_x durch die remanente Polarisation des Ferroelektrikums und dadurch eine Verlangsamung der Rekombination.

Galliumnitrid

Neben den oxidischen Halbleitern spielen nitridische Halbleiter mit großer Bandlücke eine zunehmende Rolle in den Forschungsarbeiten des MKEM. Galliumnitrid (GaN) ist dabei, die Opto- und Leistungselektronik durch seine hervorragenden Eigenschaften zu revolutionieren. Zu den besonderen

Charakteristika des GaN zählen, neben der großen direkten Bandlücke, die hohe Elektronenmobilität und Temperaturbeständigkeit sowie die Möglichkeit Heterostrukturen zu bilden. Bereits 2014 wurden die Arbeiten auf dem Gebiet der elektronischen Eigenschaften von Volumen-GaN von Valentin Garbe zunächst als Masterstudent begonnen. Dank eines Reisestipendiums der Federmann-Gruppe (Freiberger Compound Materials, FCM) konnten Teile dieser Arbeit am Technion in Haifa, Israel, durchgeführt werden. Abbildung 7 zeigt Kondensator-Strukturen auf GaN-Volumenmaterial für die Bestimmung der Volumen-Ladungsträgerkonzentration anhand von Kapazitäts-Spannungsmessungen. Die Kontakte wurden am Technion hergestellt. Die ermittelten Daten wurden mit Hall-Messungen, Infrarotspektroskopie, Röntgenbeugung und einem SIMS-Profil korreliert. Im Ergebnis zeigen diese Arbeiten ein Ladungsträgerprofil, welches durch Verunreinigungen und Fremdelementeinbau während der Herstellung mittels Hydridgasphasenepitaxie (HVPE) verursacht wird (siehe Abb. 8).

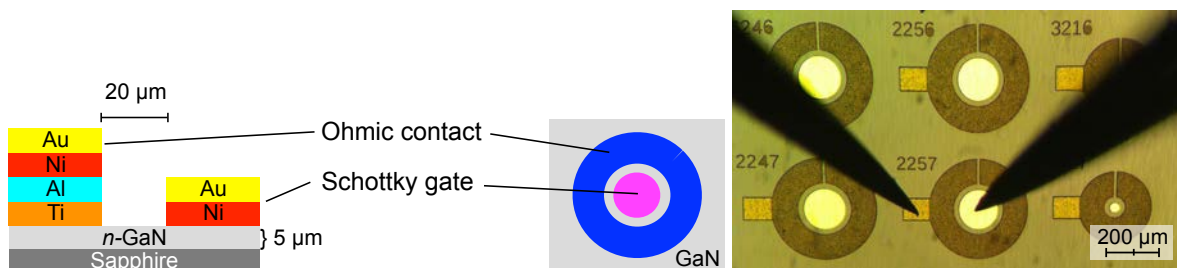


Abbildung 7: Kondensator-Strukturen für die Bestimmung von Volumen-Ladungsträgerkonzentrationen anhand von Kapazitäts-Spannungsmessungen. Links: Schematischer Aufbau der Kontakte. Rechts: Messspitzen sind auf die Kontakte aufgesetzt. Die Kontakte wurden am Technion (Haifa, Israel) hergestellt.

Diese genauen Kenntnisse des Ausgangsmaterials sind eine wichtige Voraussetzung zum Verständnis der Bildung ohmscher Kontakte zu GaN und GaN-basierten Bauelementen. Im Weiteren beschäftigte sich Valentin Garbe mit der Optimierung solcher Kontakte. Seit Beginn 2016 führt er diese Untersuchungen als Doktorand in der ESF-Nachwuchsforscherguppe HALMA (Defekt-Engineering in Wide-Bandgap-Halbleiternaterialien für Anwendungen in der Opto- und Leistungselektronik) fort. Im Fokus seiner aktuellen Arbeit stehen nun die elektronischen Eigenschaften von GaN im Volumen sowie an der Grenzfläche zu Kontakten. Ziel ist es, die lokalen strukturellen Modifikation, die durch die Herstellung der Kontakte verursacht werden, zu erforschen.

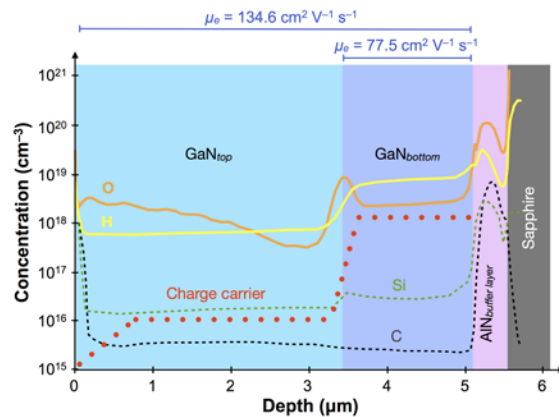
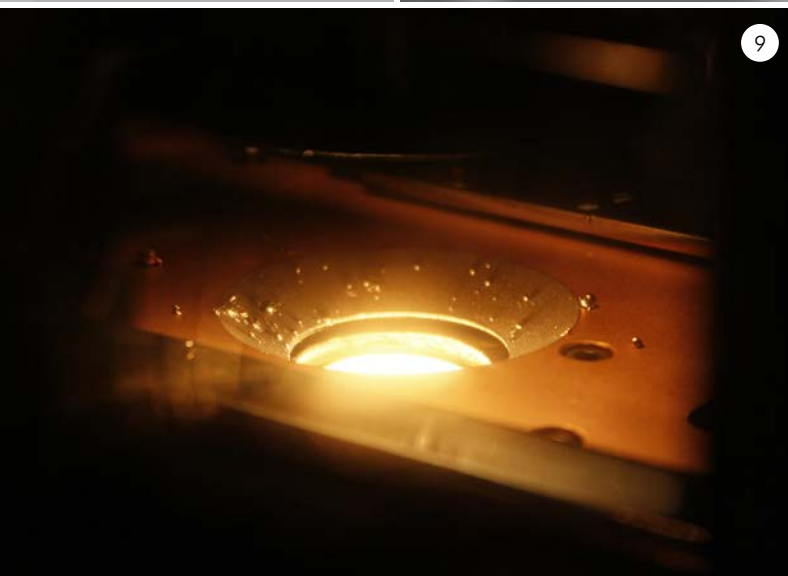
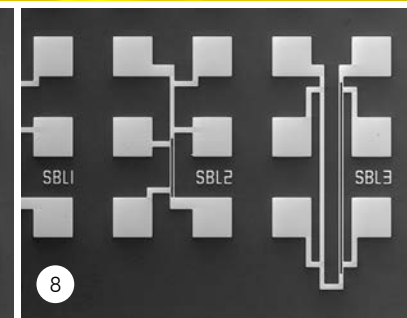
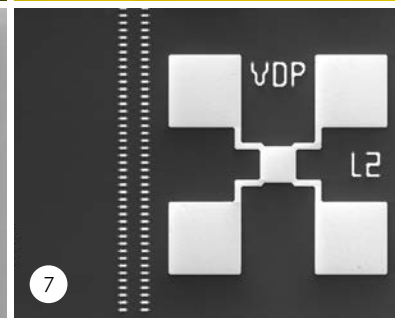
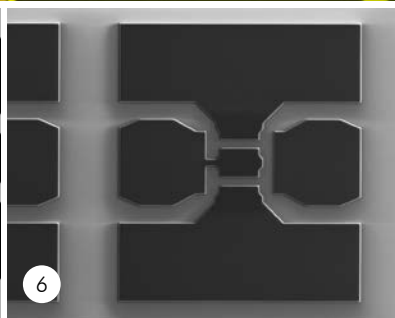
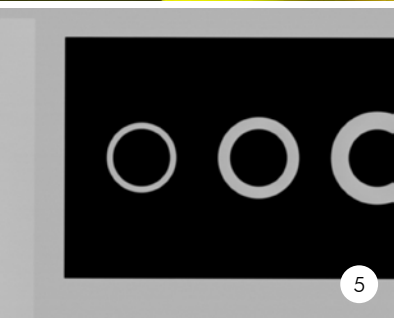
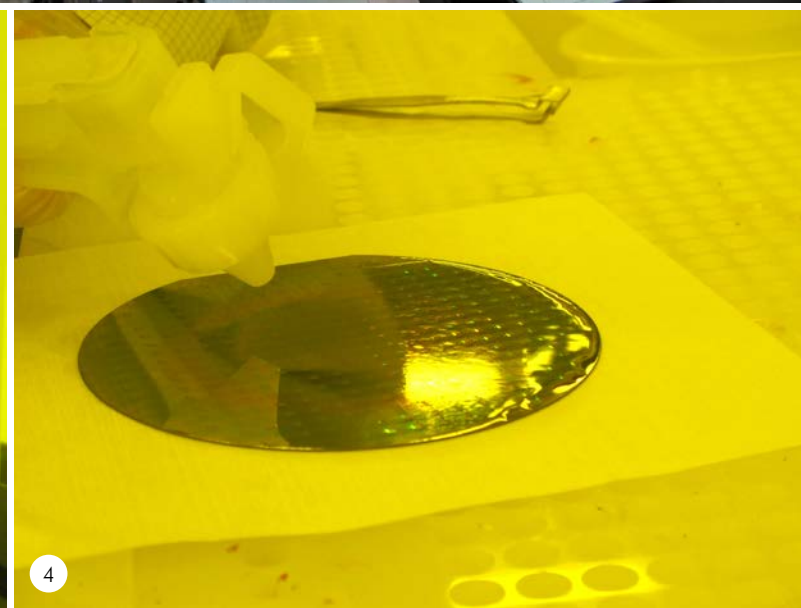


Abbildung 8: Das Tiefenprofil eines GaN-Wafers zeigt ein wachstumsbedingtes Schichtprofil. Dotierkonzentration, Ladungsträgerkonzentration und -mobilität sind angegeben.

Bilder auf der nächsten Seite:

- 1 Anschlüsse der Ätzgase an die Plasmaätzenanlage
- 2 Zweikammer-Plasmaätzenanlage
- 3 Detail am Mask-Aligner
- 4 Trocknen eines strukturierten Wafers nach der Lithographie
- 5 Zirkulare Kondensatorstruktur
- 6 Transistorstruktur
- 7 Van-der-Pauw-Struktur
- 8 SBL-Struktur
- 9 Elektronenstrahlverdampfen von Vanadium
- 10 Ätzgasentnahmestelle für die Plasmaätzenanlage



Methodisches Kompetenzzentrum Energiematerialien

Das Kompetenzzentrum Energiematerialien (ehemals NCrystED) bündelt die Forschungsinfrastruktur zur Untersuchung der kristallographischen Struktur bevorzugt einkristalliner Materialien für Energiewandlung und -speicherung. Mit besonderem Schwerpunkt werden Materialien mit komplexen strukturellen Feinheiten auf atomarer Skala, modulierte Strukturen und aperiodische Kristalle, bearbeitet, wobei die N -dimensionale Kristallographie und röntgenographisch bestimmte Elektronendichten einen besonderen Akzent bilden. Neben modernen kommen auch etablierte experimentelle und theoretische Methoden der Kristallographie zum Einsatz:

- FIB-Präparation,
- Orientierungsbestimmung,
- Röntgeneinkristalldiffraktometrie,
- Röntgenographische Bestimmung der Elektronendichte,
- N -dimensionale Kristallographie,
- *Maximum-Entropy*-Methode,
- theoretische Methoden zur Strukturmodellierung und Strukturcharakterisierung: Dichtefunktionaltheorie, *Bond-Valence*-Methode, Voronoi-Dirichlet-Partitionierung.

Insbesondere bilden experimentell bestimmte Elektronendichten die Schnittstelle zu theoretisch berechneten. Damit schließt das Kompetenzzentrum die Arbeiten des Instituts für Experimentelle Physik zwischen Theorie und Experiment bzw. elektronischer Struktur und chemischen und physikalischen Eigenschaften. Im Fokus der Arbeiten stehen vorzugsweise einkristalline Materialien mit komplexen Strukturen

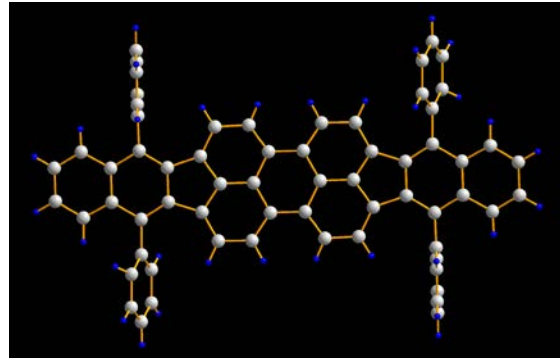


Abbildung 1: DBP-Molekül (H-Atome blau, C-Atome weiß).

aus den Bereichen der Energie- und Stoffwandlung, der Grundlagenforschung, der Mikroelektronik und der Sensorik. So wurden zurückliegend neben methodischen Arbeiten insbesondere Materialien für Elektroden und Festelektrolyte für neuartige Ansätze elektrochemischer Energiespeicher, pyroelektrische Kristalle und Farbstoffe für organische Solarzellen bearbeitet.

Gemeinsam mit dem Institut für Festkörperphysik (Lehrstuhl für Angewandte Physik/Festkörperphysik, Prof. Torsten Fritz und Dr. Roman Forker) der Friedrich-Schiller-Universität Jena wurde an der Strukturaufklärung von Tetraphenyldibenzoperiflanthene (DBP) gearbeitet (siehe Abb. 1). Dieses kristalline Material ist ein vielversprechender Kandidat für hocheffiziente organischen Solarzellen und organische Leuchtdioden. Für ausgewählte Kristalle konnte eine charakteristische Fehlordnung, die auch durch eine dreifache Überstruktur beschreibbar ist, nachgewiesen werden.

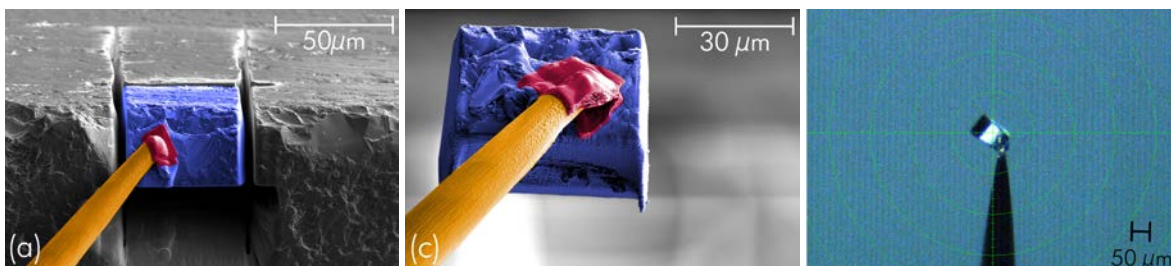


Abbildung 2: Mittels FIB präparierter Lithiumniobat-Einkristall im REM (links und Mitte) sowie auf einem Glasfaden fixiert (rechts).

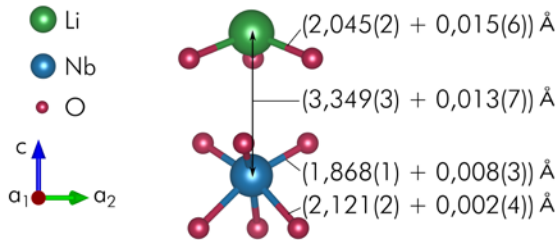


Abbildung 3: Temperaturbedingte Änderung der Bindungslängen verschiedener Polyeder in LiNbO_3 .

Im Rahmen der Masterarbeit von Tina Weigel wurden röntgeneinkristalldiffraktometrische Untersuchungen an Lithiumniobat und Lithiumtantalat begonnen (siehe Abb. 2 bis 4). Beide Stoffsysteme gehören zur Klasse der pyroelektrischen Materialien. Im Zentrum der Arbeiten steht die temperaturabhängige Bestimmung der Strukturparameter und Elektronendichten. Es ist das Ziel, den pyroelektrischen Koeffizienten auf mikroskopischer und makroskopischer Skala zu bestimmen sowie Real-

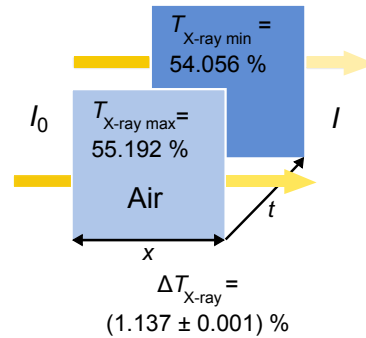


Abbildung 5: Einfluss sich ändernder Umgebungsbedingungen (Druck, Feuchte, Temperatur) innerhalb von 28 Tagen auf die Transmission von Röntgenstrahlung durch Luft.

struktureinflüsse zu untersuchen. Dementsprechend werden parallel zu den Beugungsuntersuchungen Eigenschaftsmessungen und theoretische Modellierungen mittels Dichtefunktionaltheorie durchgeführt. Die Fertigstellung der Arbeit ist für das Jahr 2016 vorgesehen.

Zurückliegend erfolgten auch Grundlagenuntersuchungen zu Umgebungseinflüssen auf die Röntgenintensitäten. Ganz wesentlich für die Qualität

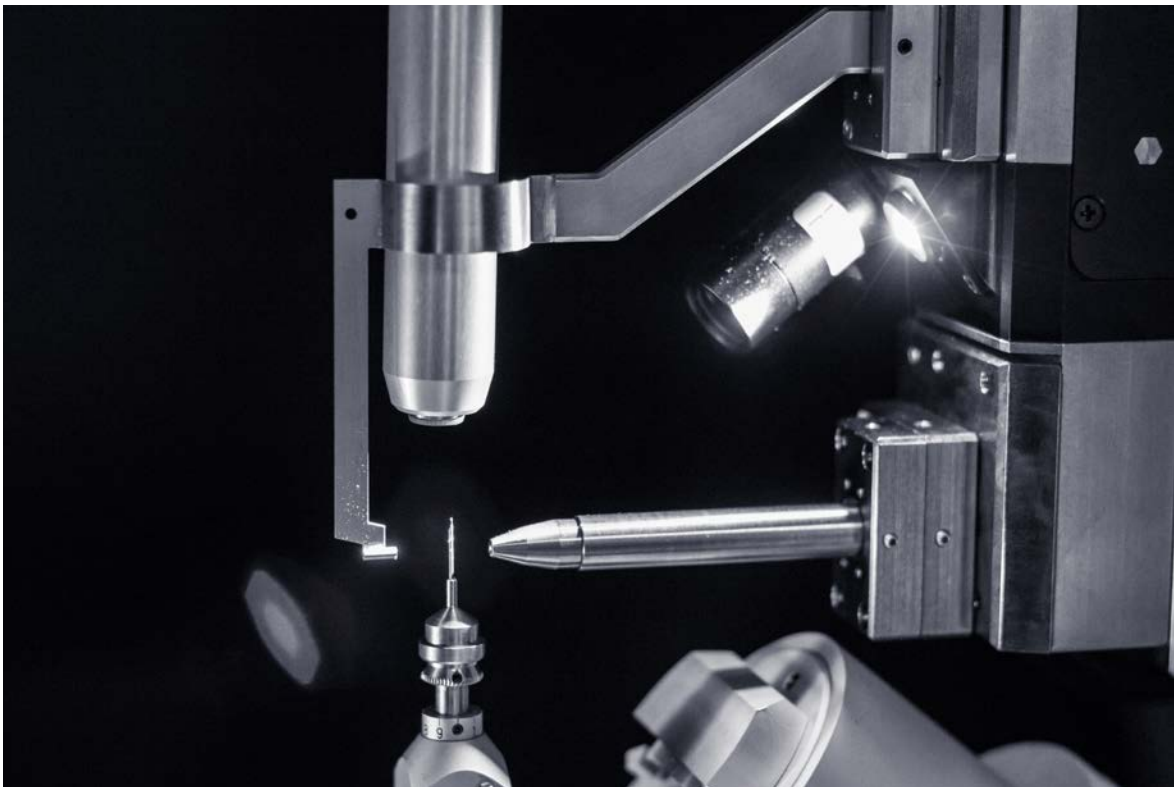


Abbildung 4: Aufbau zur Röntgenbeugung an Einkristallen (Bruker D8 Quest).

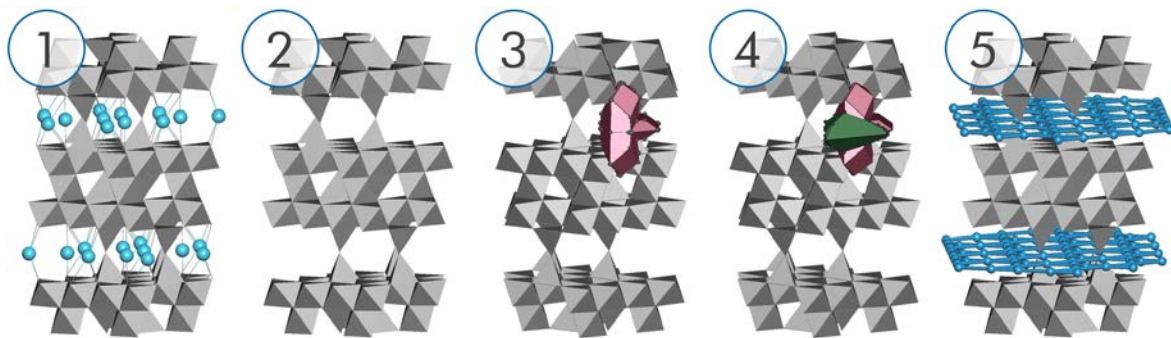


Abbildung 6: Graphische Darstellung der Voronoi-Dirichlet-Partitionierung zum Auffinden von Leitfähigkeitsnetzwerken in Festelektrolytmaterialien.

von Röntgenstrukturanalysen ist eine stabile und reproduzierbare Röntgenquelle. Üblicherweise verwendet man verschiedene optische Elemente, um einen Röntgenstrahl mit spezifischen Eigenschaften bereitzustellen. Die exakte und stabile Ausrichtung aller Komponenten ist eine Voraussetzung, um Aberrationen zu reduzieren und ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erreichen.

Neben solchen Aberrationen und elektronisch induzierten Variationen sind die Umgebungsbedingungen von besonderer Bedeutung: Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur. In einer qualitativen und quantitativen Untersuchung wurde der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Röntgenprimärstrahlintensität einer Röntgenröhre mit Cu-Anode und deren Korrelationen bestimmt (siehe Abb. 5). Dementsprechend erfolgte eine 28-tägige Überwachung der Laborbedingungen mit anschließender statistischer Auswertung der aufgenommenen Parameter. Demnach wirken sich am deutlichsten Dichteschwankungen der durchstrahlten Luft, ausgelöst durch Schwankungen des Luftdrucks, auf die Röntgenintensität aus, wobei signifikante Einflüsse auch in Bezug auf tägliche und wöchentliche Zyklen festgestellt werden konnten. Eine entwickelte und zum Patent angemeldete zeitabhängige Absorptionskorrektur konnte erfolgreich eingesetzt werden, um die Intensitätsschwankungen zu minimieren. Die Ergebnisse wurden im Artikel „Influence of environmental parameter variations on X-ray beam intensities: a time-dependent absorption correction“ im *Journal of Applied Crystallography* veröffentlicht. Tina Weigel, die als Masterstudentin diese Arbeit anfertigte,

erhielt auf dem durch die Jungen Kristallographen der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie (DGK) organisierten *Lab-Meeting* bei der STOE & Cie GmbH einen Posterpreis für die vorgestellte Arbeit.

Ein mächtiger Ansatz für die Untersuchung und Systematisierung von Kristallstrukturen ist die Voronoi-Dirichlet-Partitionierung. Hierbei wird ein mit Punkten gefüllter Raum, z. B. die Kristallstruktur, geometrisch unterteilt: jedem Punkt wird ein Polyeder zugewiesen, dessen Volumen dann wiederum Punkte umfasst, die näher zu diesem Ausgangspunkt liegen als zu jedem anderen Punkt. Eine Kristallstruktur kann dadurch in atomare Domänen, sogenannte Voronoi-Dirichlet-Polyeder (VDP), zerlegt werden (siehe Abb. 6). Jeder VDP ist durch sein Volumen, seine Flächen, Ecken und Kanten charakterisiert, wobei diese die chemischen Eigenschaften Atomgröße, Bindungsstärke, strukturimmanente Hohlräume und Kanäle repräsentieren. Das Programmpaket ToposPro nutzt diesen Ansatz und erlaubt ganze kristallographische Datenbanken damit zu bearbeiten. Hierbei wird intensiv mit der Arbeitsgruppe von Prof. Vladislav A. Blatov des Samara Center for Theoretical Materials Science der Samara National Research University in Russland zusammengearbeitet, die auch das Programmpaket ToposPro entwickelt hat.

Eine Anwendung besteht beispielsweise im Auffinden charakteristischer Netzwerke, die, im Falle von Ionenleitermaterialien, das Ionenleitfähigkeitsnetzwerk darstellen. Entsprechende Untersuchungen

erfolgten im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts CryPhysConcept zum Auffinden von Na- und Al-Ionenleitern. Die Ergebnisse sind in der Veröffentlichung „*On the Way to New Possible Na-Ion Conductors: The Voronoi–Dirichlet Approach, Data Mining and Symmetry Considerations in Ternary Na Oxides*“, die in *Chemistry – A European Journal* erschienen ist, durch Falk Meutzner zusammengefasst worden. Auf der Konferenz der Jungen Kristallographen der DGK wurde er für seine Arbeiten mit einem Posterpreis ausgezeichnet.

Projekte

BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept

Das BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept zielt auf die Entwicklung eines Zukunftskonzepts für elektrochemische Energiespeicher sowie dessen Umsetzung und Heranführung an den Markt. Dabei stehen unter Leitung von Prof. Dirk C. Meyer moderne Methoden der kristallphysikalischen Struktur- und Eigenschaftsvorhersage, der Präparation sowie der Analyse skalenübergreifend im Zentrum der Arbeiten. 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 und das Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e. V., Meinsberg. Die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien e. V. Dresden-Rossendorf unterstützt das Vorhaben im Unterauftrag.

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.

Neben Beiträgen zur Fortentwicklung etablierter Technologien zielt das Vorhaben zentral auf die Bereitstellung von Modellen voraussichtlich vollkommen neuer Systeme. Bezüglich 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.

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. Außerordentlich interessante Stoffe mit noch ungeahnten Potentialen stellen auch Biominerale dar. Diese und biomimetische Prinzipien werden im Rahmen des Projekts ebenso hinsichtlich neuartiger elektrochemischer Speicherkonzepte untersucht.

Im Jahr 2015 stand die praktische Ausarbeitung der theoretisch erarbeiteten Konzepte aus den Vorjahren im Vordergrund. Dies betraf einerseits die Anwendung der zuvor etablierten Voronoi-Dirichlet-Methode zur Identifizierung neuer Festelektrolyt- und Interkalationsmaterialien und deren Erweiterung sowie andererseits die Präparation von Materialien für die verschiedenen Speicherkonzepte auf Basis von Sauerstoffleerstellen, Al- und Fe-Ionen sowie Si-



Abbildung 1: Verschiedene Materialkonzepte. Links: Gel-Membran auf Basis von Chitin/Chitosan [RSC Advances 6 (2016) 4007]. Mitte und rechts: In Knopfzellen verpackte Na-S-/Si-Komposit-Anodenmaterial-Zellen.

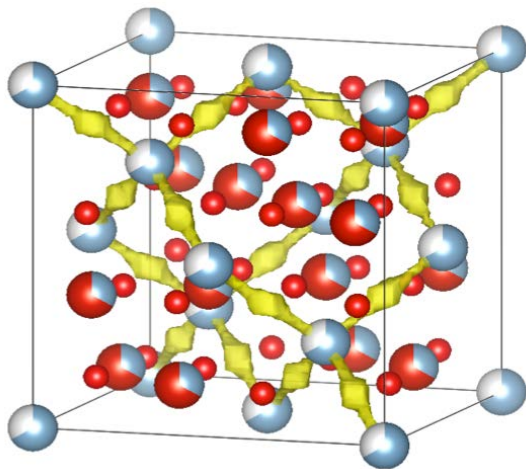


Abbildung 2: Darstellung der mithilfe des *Bond-Valence-Energy-Landscape*-Ansatzes berechneten Leitungspfade (gelb) in einem potentiellen Aluminium-Leiter (Kugeln = Atome).

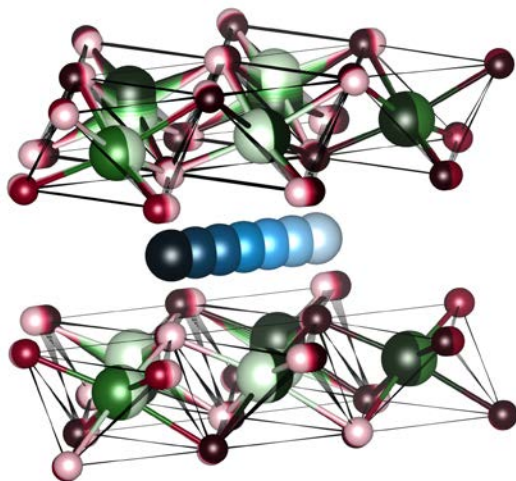


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Modellierung eines Diffusionsvorgangs mithilfe von Dichtefunktionaltheorie (Kugeln = Atome).

und Chitin-basierten Elektrodenmaterialien (siehe Abb. 1). Hervorzuheben sind folgende Themen:

- Arbeiten zur Erweiterung des Kristallographie-Ansatzes zur Identifikation neuer Ionenleiter und Interkalationsmaterialien um die *Bond-Valence-Energy-Landscape*-Methode (siehe Abb. 2),
- die Weiterentwicklung der Elektrode für eine Metall-Luft-Batterie durch gezielte Modifizierung eines Strontiumtitanat-Einkristalls zur Begünstigung des Ein- und Ausbaus molekularen Luftsauerstoffs,

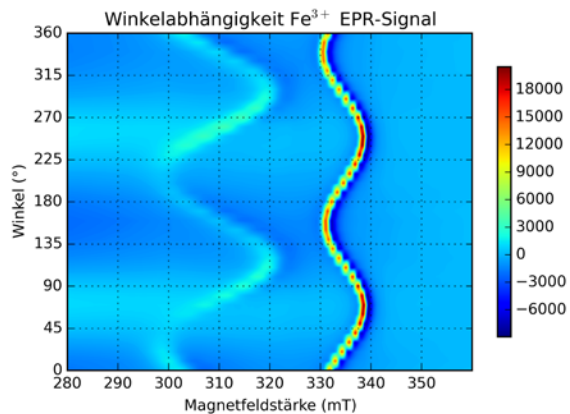


Abbildung 4: Elektronenspinresonanzspektroskopie von eiseninterkalierten Graphitekristallen.

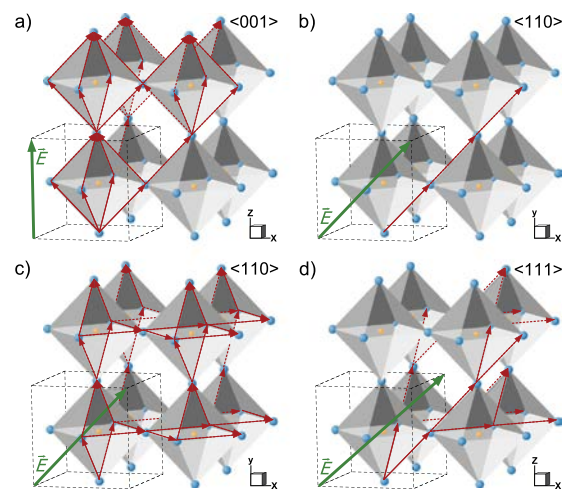


Abbildung 5: Sauerstoffvakanzmigrationspfade entlang des TiO_6 -Oktaedernetzwerks bei angelegtem elektrischen Feld (grüner Pfeil) für verschiedene kristallographische Richtungen des SrTiO_3 [Journal of Physics: Condensed Matter 28 (2016) 225001].

- die Ermittlung von Ionenleitern und Interkalationsmaterialien für Al-Ionen (siehe Abb. 3),
- die Weiterentwicklung der Präparation dünner Schichten von kristallinen Al-Ionenleitern für Festkörperionenbatterien – Tina Nestler erhielt hierfür den „Best Student Presentation Award“ anlässlich ihres Beitrags „Solid Electrolytes for Thin-Film Al-Ion Batteries“ auf dem E-MRS Fall Meeting in Warschau, Polen, im September 2015,
- die Untersuchung von Materialien für die Interkalation von Fe-Ionen (siehe Abb. 4),

- die Weiterentwicklung der Chitin-basierten Elektrode zur Erhöhung der Kapazität von Elektrolytkondensatoren,
- die Verbesserung eines *All-Solid-State*-Sekundärspeichers auf Basis eines Oxidmaterials (siehe Abb. 5),
- die Erarbeitung von Vorschlägen für neue vielversprechende Festelektrolyte für die Na-S-Technologie (Abb. 6),
- die Entwicklung und Patentierungsvorbereitung eines weiteren Konzepts zur Energiespeicherung mit Anodenmaterialien auf Si-Basis (siehe Abb. 7),
- die Zusammenfassung der auf der EStorM 2015 diskutierten Themen „Megatrends, Rohstoffe, neue Speichermaterialien, Festelektrolyte, Recycling, Modellierung und Charakterisierung“ im Buch „Electrochemical Storage Materials: Supply, Processing, Recycling and Modelling“, das im AIP Publishing Verlag im Juni 2016 erscheint.

Mithilfe des Projektträgers gelang es für die Präparation von elektrochemischen Zellen und die spektroskopische Charakterisierung der Zellmaterialien eine Argon-Glovebox, ein Elektronenspinresonanz-Spektrometer (ESR) und ein UV/VIS-Spektrometer zu beschaffen (siehe Abb. 8) und in Betrieb zu nehmen.

Weitere wichtige Aktivitäten im Zusammenhang betrafen die Organisation und Durchführung der 2nd *International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials* (EStorM 2015), die vom 11. bis 12. Juni 2015 stattfand (siehe Bericht auf S. 81). Ferner wurde die internationale Vernetzung u. a. durch Auslandsaufenthalte intensiviert:

- Tina Nestler führte im Mai 2015 einen vierwöchigen vom *German-Russian Interdisciplinary Science Center* finanzierten Forschungsaufenthalt an der *Lomonosov Moscow State University* (Moskau, Russland), an der Fakultät für Elektrochemie und Materialwissenschaften in der Gruppe von Prof. Evgeny V. Antipov und Daniil M. Itkis durch (siehe Bericht auf S. 55).

- Falk Meutzner wurde durch ein Federmann-Stipendium in Kooperation mit *Freiberg Compound Materials* ein dreimonatiger Forschungsaufenthalt an der Bar-Ilan-Universität (Ramat Gan, Israel) in der Arbeitsgruppe von Prof. Doron Aurbach ermöglicht (siehe Bericht auf S. 56).
- Falk Meutzner und Tilmann Leisegang besuchten die *Samara National Research University* (Samara, Russland) und nahmen ebenfalls an der *International Scientific School „Combined Topological and DFT Methods for Prediction of New Materials“* des Samara Center for Theoretical Materials Science (Direktor: Prof. Vladislav A. Blatov) im September 2015 teil.

Die nationale Vernetzung erfolgte durch das weitere Engagement im Arbeitskreis „Speicher- und Netzdienstleistungen“ des Energy Saxony e. V. und als Mitglied des Verbunds *Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany* (HYPOS). Hierbei decken sich die Ziele des Projekts mit denen der jeweiligen Initiativen, wobei sich regionale Kompetenzträger auf dem Gebiet der Energiewandlung und -speicherung aus Wissenschaft und Industrie vernetzen, um neuartige Speicherkonzepte verwertungsorientiert voranzutreiben und vereint die Aktivitäten nach außen zu repräsentieren. Ferner wurde eine Besichtigung der Litarion GmbH im September 2015 durchgeführt (siehe Bericht auf S. 57).

Durch Mitwirkung am Fernsehbeitrag der MDR-Umschau „Thermoskanne, energieautarkes Haus und stationäre Energiespeicher – Wie hängen diese zusammen?“ im August 2015, an der Sonderausgabe der Leipziger Volkszeitung zum Thema „Energie“ im Dezember 2015 sowie der Einreichung und Veröffentlichung von insgesamt 16 wissenschaftlichen Artikeln, mehr als 21 Beiträgen zu nationalen und internationalen Konferenzen, fünf Pressemitteilungen und dem Abschluss von sechs Graduararbeiten, erfolgte die Kommunikation der einzelnen im Projekt bearbeiteten Themen. Nach 36 Monaten Projektlaufzeit ist die Wissensbasis zu elektrochemischen Energiespeichermaterialien und Energiespeichertechnologien damit wesentlich verbreitert worden.

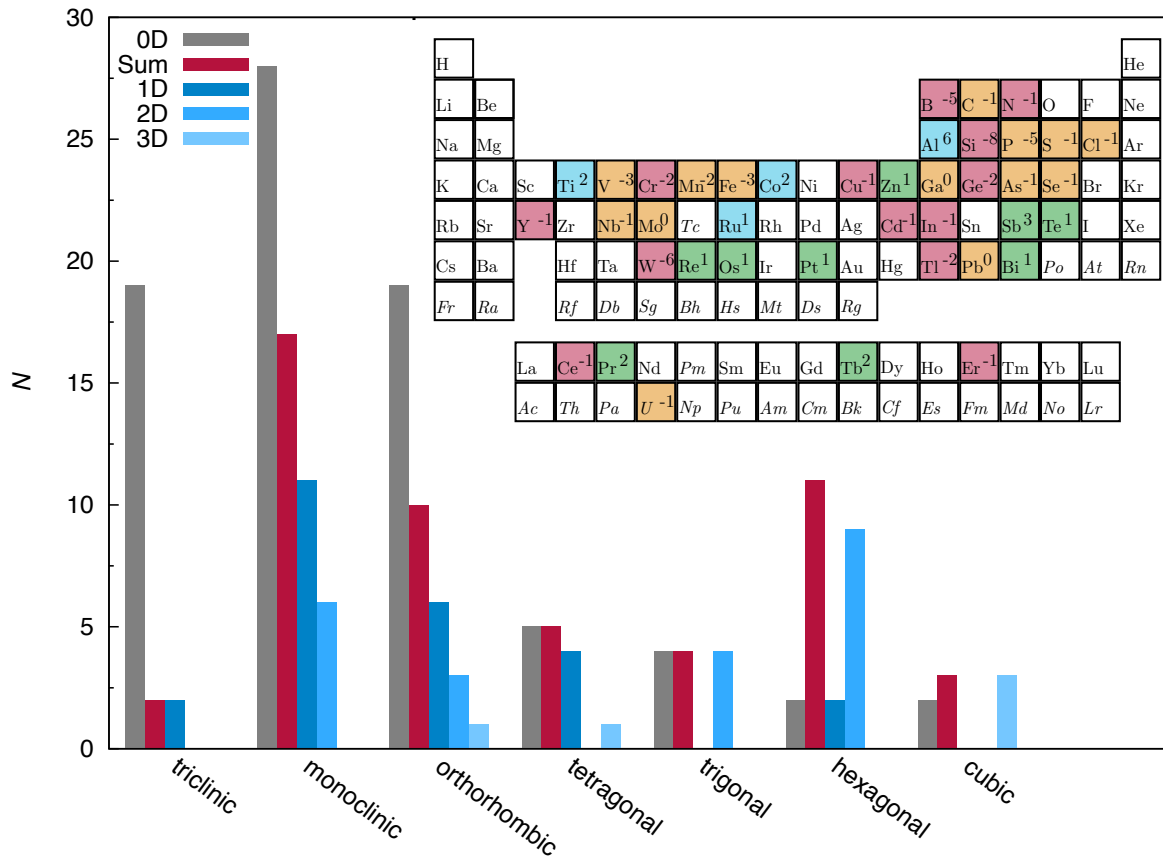


Abbildung 6: Charakteristika von Na-Ionenleitermaterialien: Dimensionalität der Leitungskanäle, Kristallsystem und vorteilhafte chemische Elemente [Chemistry – A European Journal 21 (2015) 16601].

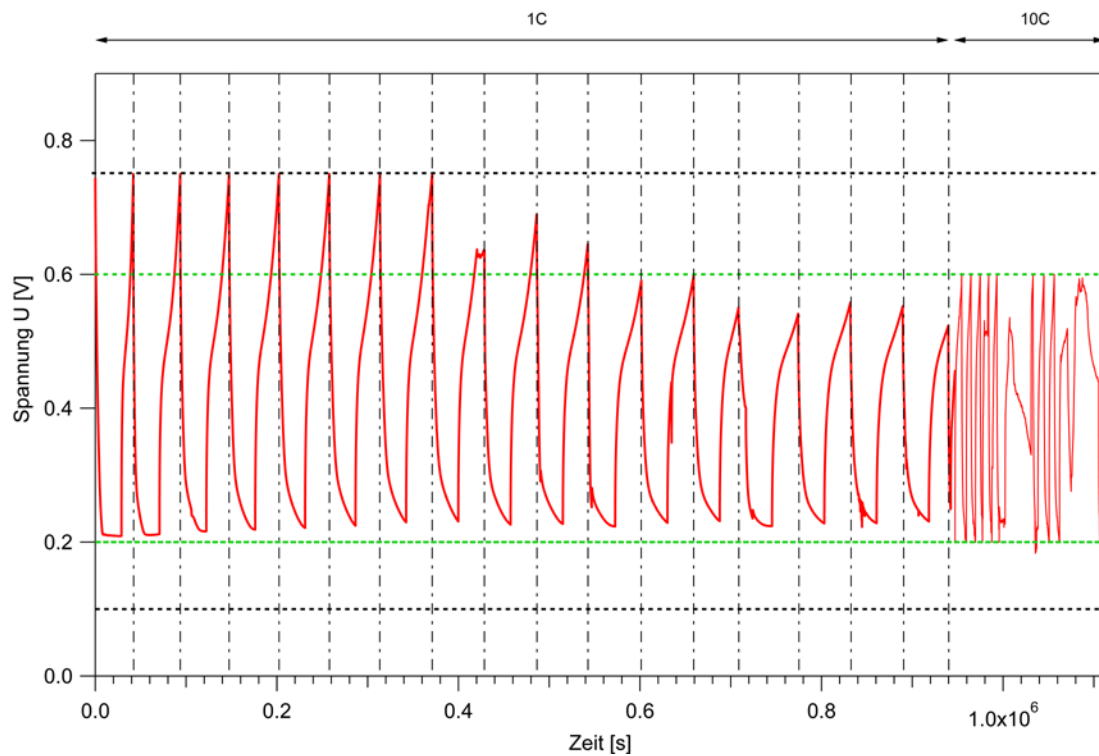


Abbildung 7: Lade-Entladezyklen einer Batterieknopfzelle aus Si-Komposit-Anodenmaterial für unterschiedliche Entladeraten.

Im Oktober fand durch den Projektträger eine Vor-Ort-Kontrolle statt. Das Projektmanagement und die Projektarbeiten wurden in diesem Zusammenhang ausdrücklich gelobt.

Die aktuellen Arbeiten zielen auf die Realisierung neuer Festelektrolytmaterialien, Festkörperbatteriekonzepte auf Basis multivalenter Ionenspezies und einer Si-basierten Elektrode sowie auf die Vorbereitung weiterer Patentanmeldungen, die Planung und Vorbereitung eines Messeauftritts auf der Hannover Messe im April 2016 sowie die Einwerbung und Antragstellung von Anschlussvorhaben.

Die Bereitstellung der finanziellen Mittel (Projektnummer 03EK3029A) erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie durch den Projektträger Jülich (PTJ) – für die Unterstützung des Vorhabens danken wir insbesondere Frau Kerstin Annassi.

Forschungsaufenthalt von Tina Nestler an der Lomonosov Moscow State University

Seit dem Beginn des SyNeSteSia-Projekts arbeitet das Institut mit der Arbeitsgruppe um Dr. Daniil Itkis (Fakultät für Materialwissenschaften) und Evgeny V. Antipov (Fakultät für Elektrochemie) der Lomonosow-Universität Moskau zusammen. Um die Kooperation zu vertiefen und spezielle Erfahrungen im Bereich der oxidischen Batteriematerialien auszutauschen, besuchte Tina Nestler im Mai 2015 einen Monat lang die Arbeitsgruppe in der prestigeträchtigsten russischen Universität und wohnte dabei im größten Gebäude einer Bildungseinrichtung der Welt (siehe Abb. 9). Gefördert wurde der Aufenthalt von G-RISC, einem Programm welches mit Mitteln des DAAD speziell den Austausch deutscher und russischer Doktoranden fördert. Damit bot sich ihr die einmalige Gelegenheit die bisherigen Überlegungen und experimentellen Arbeiten im Rahmen von CryPhysConcept zu Al-Ionen-Batterien vor ausgewiesenen Experten für kristalline Festkörperelektrolyte und Interkalationsmaterialien vorzustellen. Wertvolle Anregungen führten zur vertieften theore-



Abbildung 8: In Betrieb genommene Geräte: Argon-Glovebox (oben), Elektronenspinresonanzspektrometer MS 5000 (Mitte) und UV/Vis-Spektrometer Specord S600 (unten).



Abbildung 9: Hauptgebäude der Lomonosov Moscow State University.

tischen Betrachtung der bearbeiteten, aber in Folge auch von noch unbetrachteten, vielversprechenden Materialien mithilfe von *Data-Mining*-basierten kristallographischen Methoden. Des Weiteren wurden gemeinsam glaskeramische Lithium-Ionenleiter hergestellt (siehe Abb. 10) und röntgenographisch sowie mit Impedanzspektroskopie untersucht. Aktuell münden diese Arbeiten in gemeinsame Publikationen und Folgeprojektanträge.

Forschungsaufenthalt von Falk Meutzner an der Bar-Ilan Universität in Ramat Gan, Israel

Im Zeitraum vom 31.03. bis 21.06.2015 besuchte Falk Meutzner die Arbeitsgruppe von Doron Aurbach am Institut für Chemie der Bar-Ilan-Universität in Ramat Gan (siehe Abb. 11). Den Schwerpunkt der Arbeiten bildete einerseits das Kennenlernen von elektrochemischen Analysen und andererseits das Entwickeln von Konzepten für eisenbasierte Batterien. Am Anfang wurden seine Arbeiten von Frau Prof. Elena Levi unterstützt, die die potentielle Interkalation von Magnesiumionen in Chevrelphasen untersucht. Sie nutzt die *Bond-Valence*-Methode für eine kristallographische Analyse der Strukturen: Können intrastrukturelle Lücken durch Magnesiumionen besetzt werden und können Sprünge zwischen diesen durchgeführt werden? Ihre Methode ist daher der von Falk Meutzner genutzten Methode komplementär. Bereits vor seinem Aufenthalt in Israel hatte



Abbildung 10: Herstellung glaskeramischer Lithium-Ionenleiter.

er die Idee entwickelt, die *Bond-Valence*-Methode in das von ihm genutzte Programmpaket ToposPro zu implementieren. Im Rahmen der Zusammenarbeit konnte bestätigt werden, dass die Kombination beider Methoden ein außerordentlich hohes Synergiepotential bereithält. Dementsprechend wird Falk Meutzner vertiefend an der Kombination beider Methoden arbeiten.

Der zweite Teil seines Aufenthalts beschäftigte sich mit der praktischen Umsetzung von Eiseninterkalation in Chevrelmaterial mithilfe verschiedener Elektrolytlösungen, was zunächst keine vielversprechenden



Abbildung 11: Besucher-Zentrum (links) und Abteilung für Chemie (rechts) der Bar-Ilan-Universität.

Ergebnisse lieferte. Durch die Kürze des Aufenthalts entschied er sich daher, sich auf die grundlegende Elektrochemie zu konzentrieren und begann einfache Interkalationsexperimente mit Lithium und Magnesium zusammen mit Dr. Yosef Gofer und seiner Arbeitsgruppe. Durch die intensiven Diskussionen lernte er viel darüber, wie zyklische Voltammogramme und galvanostatische Lade- und Entladekurven gelesen und interpretiert werden. Der Aufbau der Zellen war sehr interessant und wichtig, um das Grundlagenwissen auszubauen und zu erkennen, wie einfach die Methodik arbeitet. Natürlich kommt Expertise nur durch Erfahrung, weshalb die Anwendung der Erkenntnisse im Rahmen von CryPhysConcept eingesetzt werden sollen.

Neben der Arbeit fand sich während des Aufenthalts auch Gelegenheit das Land Israel und die angrenzenden Länder Jordanien und Ägypten zu bereisen. Trotz der anfänglichen Besorgnis über die Sicherheitslage fühlte sich Falk Meutzner an jedem Ort extrem sicher und willkommen. Besonders beeindruckend war es, zu sehen, wie modern zum einen das gerade einmal 100 Jahre alte Tel Aviv ist, und wie zum anderen Jerusalem ein Geschichts- und religiöses Zentrum für die gesamte westliche Welt darstellt. Allen Mitgliedern der Gruppe von Prof. Aurbach soll hier ganz besonders für ihre Hilfe und Ratschläge zum israelischen Leben gedankt werden.

Zukünftig sollen die kennengelernten Methoden weiterentwickelt und das neu erworbene Wissen angewendet werden. Im September dieses Jahres findet ein Workshop in Samara, Russland, statt, der sich mit topologischer Analyse mit ToposPro und der Kombination mit DFT-Berechnungen beschäftigt. Im Zuge dieses Kurses sollen die geplanten Programmierarbeiten aufgenommen werden, um die im Rahmen von CryPhysConcept entwickelten Ideen umzusetzen. Zusammen mit Yosef Gofer wurden zudem Experimente mit *Black Silicon* geplant. Dessen Interkalationsverhalten mit Natrium und Magnesium, eventuell Lithium, soll untersucht werden.

Falk Meutzner bedankt sich insbesondere bei Doron Aurbach für die Einladung in seine Arbeitsgruppe, die ihm entgegengebrachte Offenheit und das In-

teresse an seiner Arbeit. Zudem dankt er herzlich Yosef Gofer und Elena Levi für die intensiven Diskussionen, die Bereitstellung von Literatur und die Unterstützung darüber hinaus.

Ein besonderer Dank geht an David Federmann und FCM für die finanzielle Unterstützung und damit Ermöglichung des Forschungsaufenthalts in Israel.

Unternehmensbesichtigung bei der Litarion GmbH

Am 9. September 2015 folgte die Arbeitsgruppe einer Einladung von Herrn Dr. Martin Schuster,



Senior-Projektmanager der Litarion GmbH, nach Kamenz zur Unternehmensbesichtigung. Hierbei standen insbesondere das Kennenlernen von Produktionsprozessen im Bereich der Energiespeichermaterialien sowie die damit verknüpften Technologien und spezifischen Herausforderungen im Vordergrund, um diese im Rahmen der laufenden Forschungsarbeiten einbeziehen zu können.

Nach einer Vorstellung der Unternehmenshistorie folgte ein ausgedehnter Unternehmensrundgang. Hierbei wurden die verschiedenen Produktionslinien auf denen das Unternehmen mittels modernster Beschichtungstechnologie unter den Markennamen Litarion® und Separion® Elektroden und keramische Separatoren für großformatige, hocheffiziente, besonders sichere Lithium-Ionen-Batteriesysteme fertigt, vorgestellt und besichtigt. So konnten Einblicke in die Technologien sowie damit verknüpfte Herausforderungen der hochpräzise arbeitenden Maschinen gewonnen werden. Die Litarion GmbH ist seit April 2015 ein Tochterunternehmen des kanadischen Batteriespezialisten Electrovaya und Deutschlands führender Hersteller von Elektroden und keramischen Separatoren für Lithium-basierte Energiespeicher.

Wir danken Herrn Dr. Schuster und der Litarion GmbH für ihre herzliche Einladung.

BMBF-Verbundprojekt

SyNeSteSia – Synchrotron- und Neutronen-basierte Untersuchungen zur Energiespeicherung

Das deutsch-russische Projekt SyNeSteSia (engl. „Synchrotron and Neutron Studies for Energy Storage“) erforscht mit Synchrotron- und Neutronen-basierten Methoden elektrochemische Prozesse an Grenzschichten innerhalb elektrochemischer Energiespeicher (siehe Abb. 1). Am Verbundprojekt, das vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Ministerium für Bildung und Wissenschaft der Russischen Föderation im Rahmen der ersten Kooperationsinitiative des Ioffe-Röntgen-Instituts gefördert wird, sind die TU Bergakademie Freiberg, das Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion, die *Lomonosov Moscow State University*, das *Joint Institute for Nuclear Research* in Dubna und das *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry* in Novosibirsk beteiligt. Das Projekt wird dabei vom Institut für Experimentelle Physik unter der Leitung von Prof. Dirk C. Meyer koordiniert.

Das wissenschaftliche Ziel des Projektes ist, durch die Nutzung von neuartigen *In-operando*-Charakterisierungsmethoden elektrochemische Vorgänge sowie Strukturveränderungen an elektrochemischen Grenzflächen aufzuklären. Insbesondere durch die sich ergänzenden Expertisen und Messmethoden der einzelnen Projektpartner wird es möglich, verbesserte Modellvorstellungen über die untersuch-

ten elektrochemischen Grenzflächen zu generieren und somit einen Beitrag zur Weiterentwicklung von nachhaltigen, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energiespeichern zu leisten. Hierfür beschäftigen sich die Projektpartner u. a. mit Materialien für Interkalationskathoden und Festelektrolyten deren Einsatz in Li-Ionen- und Li-Luft-Akkumulatoren vorgesehen ist.

Das Institut für Experimentelle Physik konzentriert sich dabei im Projekt, unter der wissenschaftlichen Leitung von Dr. Anastasia Vyalikh und der Mitarbeit von Dr. Wolfram Münchgesang, auf *in operando* durchgeführte Struktur- und Dynamikuntersuchungen an elektrochemischen Grenzflächen mittels Nuklearer Magnetresonanz (NMR). Des Weiteren werden ergänzende Informationen *ex operando* durch die elektrochemische Impedanz-Spektroskopie (EIS), die „klassische“ NMR sowie die Elektronenspinresonanz (ESR) gewonnen.

Für die *In-operando*-Charakterisierungen wurde ein Messaufbau einschließlich NMR-tauglicher *In-operando*-Messzelle (siehe Abb. 2) entwickelt und an Li-Ionen-Akkumulatoren mit Kathoden aus amorphem Carbon-¹³C getestet (siehe Abb. 3), die vom Projektpartner am *Nikolaev Institute of Inorganic Che-*

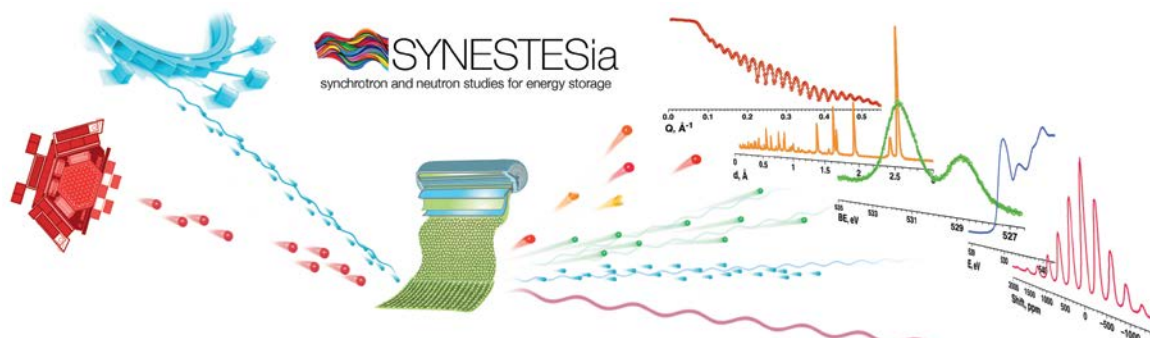


Abbildung 1: Graphische Darstellung des Projekts SyNeSteSia.

mistry hergestellt wurden. Durch die Möglichkeit des Autotunings im Messaufbau ist es dabei möglich, mehrere NMR-aktive Elemente während eines Zyklus der elektrochemischen Zelle sequenziell zu untersuchen und dadurch die Informationstiefe über die elektrochemischen und strukturellen Vorgänge zu erhöhen.

Neben den elektrochemischen Vorgängen und strukturellen Änderungen in Li-Ionen- und Li-Luft-Akkumulatoren wurden Arbeiten zur Dynamik von aktiven Spezies, wie Li und Na, in Festelektrolyten durchgeführt. Hierbei soll durch die Kombination von temperaturabhängigen elektrochemischen Impedanz- und NMR-Relaxometriemessungen die Korrelation zwischen der lokalen Mobilität der Ionen, ihrer jeweiligen chemischen Umgebung (Phase) und der Ionenleitfähigkeit des Gesamtsystems untersucht und erklärt werden.

Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (05K2014).



Abbildung 2: In-operando-NMR-Messzelle (oben) und NMR-Messkopf mit Messzelle (unten).

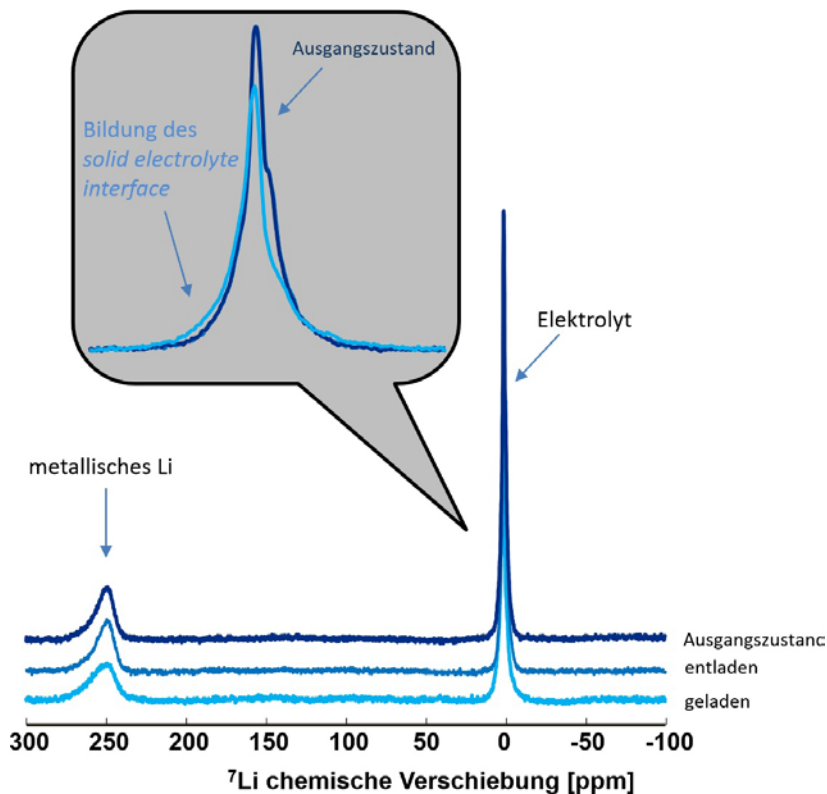


Abbildung 3: In operando aufgenommene ^7Li -NMR-Spektren bei verschiedenen Ladezuständen.

BMU-Verbundprojekt

BaSta – Batterie Stationär in Sachsen

Natrium (Na) und Schwefel (S) als mögliche Aktivmaterialien für Batterieanwendungen sind in großen Mengen verfügbar und daher kostengünstig. Das Prinzip des sogenannten Na-S-Akkumulators und der wirtschaftliche Betrieb dieses Batterietyps sind für Betriebstemperaturen oberhalb von 300 °C unter Praxisbedingungen bereits nachgewiesen. Weltweit wird er für die mittel- bis langfristige Energiespeicherung erfolgreich eingesetzt. Somit stellen Na-S-Akkumulatoren eine kostengünstige und ressourcenschonende Alternative zur etablierten Li-Ionen-Technologien, insbesondere für stationäre Anwendungen, dar.

Für elektrochemische Energiespeicheranwendungen im Megawattbereich besitzt die sogenannte Hochtemperatur-Na-S-Batterietechnologie momentan den größten Marktanteil und ist damit von globalem Interesse. Die *Ford Motor Company* entwickelte die erste Natrium-Schwefel-Batterie in den 1960er Jahren. Dies war aufgrund der zuvor entdeckten chemischen Verbindung $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$ (β -Aluminiumoxid) möglich, welche eine hohe Leitfähigkeit für Natriumionen bei Betriebstemperaturen von über 300 °C aufweist. Diese wurde von Ford

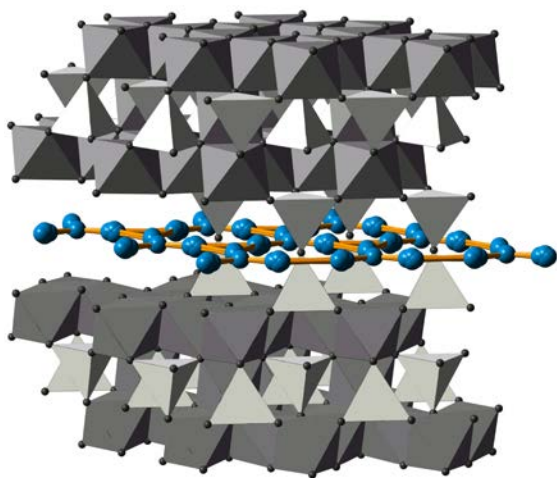
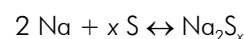


Abbildung 1: Migrationspfade (dargestellt durch verbundene blaue Kugeln) für Natriumionen in β -Aluminat.



für Elektrofahrzeuge in den 1990er Jahren verwendet. *NGK Insulators Ltd.* aus Japan entwickelte auf β -Aluminiumoxid basierende keramische Festelektrolyte und verbesserte so das Na-S-Konzept (siehe Abb. 1). Gemeinsam mit der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) konnte so der Anwendungsbereich dieser Energiespeichertechnologie erweitert werden. Im Jahr 2003 startete NGK die Produktion in kommerziellem Maßstab. Bis heute sind mehr als 155 Systeme mit einer Gesamtleistung von ca. 340 Megawatt weltweit installiert worden.

Die Hochtemperaturvariante besitzt jedoch auch Nachteile, die die Wirtschaftlichkeit begrenzen. So kann die theoretisch nutzbare Energiedichte der zugrundeliegenden chemischen Reaktion



nicht vollständig ausgenutzt werden, da Produkte mit $x \leq 2$ unter den gegebenen Betriebsbedingungen nicht mehr löslich sind. Zudem führt die Bereitstellung der für die Betriebstemperatur von ca. 350 °C benötigten Heizenergie zu einer Verringerung der Gesamteffizienz und die Verwendung von flüssigem Natrium bedingt hohe Sicherheitsanforderungen.

Zur Überwindung der Nachteile der Hochtemperatur-Na-S-Technologie wird im Verbundprojekt „BaSta – Batterie Stationär in Sachsen“, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziert und durch das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) in Dresden koordiniert wird, an der Entwicklung einer Niedertemperatur-

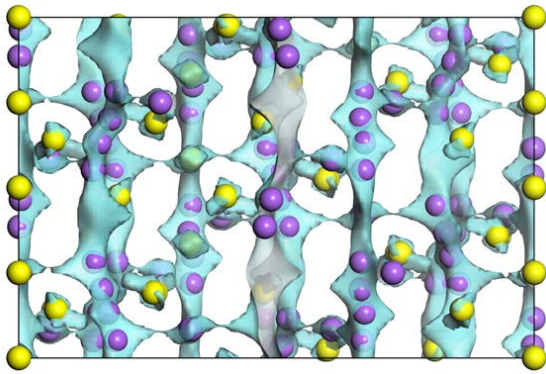


Abbildung 2: Bond-Valence-Energy-Landscape der Na^+ -Migrationspfade in der N5-Phase des glaskeramischen NYS-Systems.

variante des Na-S-Akkumulators gearbeitet. Auf Freiburger Seite koordinieren Dr. Tilmann Leisegang und Dr. Wolfram Münchgesang die Arbeiten. Im Rahmen des Teilprojekts „Multiskalen-Betrachtung für ressourceneffiziente Materialkonzepte“ arbeitet das Institut für Experimentelle Physik (Prof. Dirk C. Meyer) zusammen mit dem Institut für Werkstoffwissenschaft (Prof. David Rafaja) an der Identifikation und der Optimierung neuer Aktivmaterialien für den Niedertemperatur-Na-S-Akkumulator sowie an der Aufklärung von Struktur-Eigenschaft-Beziehungen. Dementsprechend stehen der Zusammenhang zwischen Kristallstruktur bzw. Gefüge und lokaler bzw. globaler Ionenleitfähigkeit im Mittelpunkt der experimentellen und theoretischen Arbeiten des IEP. Das BaSta-Teilprojekt fügt sich damit in die langfristig angelegten Aktivitäten des IEP zu elektrochemischen Energiespeichern ein. Im Rahmen von BaSta sollen am IEP insbesondere folgende Herausforderungen beim Übergang vom Hoch- zum Niedertemperaturakkumulator gelöst werden:

- Erhöhung der Kapazität, Ionenzugänglichkeit und Stabilität von Anoden und Kathodenmaterial durch Optimierung bzw. Neuentwicklung von geeigneten Interkalationsmaterialien,
- Steigerung der Ionenleitfähigkeit von Na-Festelektrolyten bei Raumtemperatur durch Verbesserung des prozesstechnischen und physikalischen Verständnisses und



Abbildung 3: Präparation einer Knopfzelle für Untersuchungen außerhalb einer Schutzatmosphäre.

- Aufklärung und konstruktive Vermeidung von Degradationsmechanismen.

Im zurückliegenden Jahr konzentrierten sich die Forschungsaktivitäten auf Festelektrolyte aus dem glaskeramischen $\text{Na}_2\text{O}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ -(NYS)-System, die am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) in Dresden hergestellt wurden (siehe Abb. 2). Hierbei erfolgten insbesondere Untersuchungen zu Ionenmigrationspfaden, der Mobilität der mobilen Spezies Na^+ und der kristallographischen Phasenzusammensetzung. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden von den Projektpartnern genutzt, um die Herstellungstechnologien zu optimieren. Weiterhin wurden die Phasenstabilität und die Eignung von vielversprechenden neuen Anoden- und Festelektrolytmaterialien untersucht und bewertet (siehe Abb. 3). Zudem beteiligten sich die Mitarbeiter des Projekts an der Ausrichtung und Durchführung der „2nd International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials – EStorM“. Ein Fernsehbeitrag des MDR berichtete außerdem über die Freiburger Aktivitäten zur Na-S-Batterie.

Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (0325563D) sowie dem Projektträger Jülich, insbesondere Herrn Dr. Aleksandar Rakić.

Chemical Crystallography Beamline am DESY-Synchrotron PETRA III

Mit Spannung dürfen Materialwissenschaftler auf das Jahr 2017 blicken, in dem zwei neue Experimentierhallen des Synchrotrons PETRA III am DESY mit je mehreren Messstationen („Beamlines“) für den Nutzerbetrieb öffnen. Darunter befindet sich auch die „Chemical Crystallography Beamline“, an der das Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg in den letzten Jahren mitentwickelt hat und auch in Zukunft Verantwortung übernehmen wird. Im Rahmen des Förderschwerpunktes „Erforschung kondensierter Materie an Großgeräten“ besteht eine Beteiligung an der Planung der Messapparatur mit Fokus auf die Optimierung für wellenlängenabhängige Röntgenbeugung.

Das Helmholtz-Zentrum DESY ist eines der führenden Beschleunigerzentren weltweit. Das Synchrotron PETRA III ist seit 2009 in Betrieb und derzeit die brillianteste Röntgenstrahlungsquelle der Welt, insbesondere im „harten“ Röntgenbereich. Die 14 Messplätze mit bis zu 30 Instrumenten bieten schon heute Forschern aus vielen Bereichen einzigartige Experimentiermöglichkeiten mit hoch-intensivem, sehr kurzwelligem sowie gepulstem Röntgenlicht. Ab 2017 werden mit der Erweiterung nun, einschließlich der *Chemical Crystallography Beamline*, 10 neue Stationen zur Verfügung stehen. Das Strahlrohr wird mit einem Undulator zur Monochromatisierung und zwei Diffraktometern in Kappa- bzw. Eulergeometrie optimale Voraussetzungen für Röntgenbeugungsexperimente bereitstellen.

Neben chemischer Kristallographie stehen dabei vor allem Schwerpunkte der Materialwissenschaften, sowie der Geo-, Bio- und Umweltwissenschaften im Fokus der geplanten Forschung. Typische Anwendungen umfassen dabei sowohl diffuse Streuung, Elektronendichteanalysen und Phasentransformationen, als auch fehlgeordnete und modulierte Strukturen, auch unter dem Einfluss von externen Feldern, hohen Drücken und hohen bzw. tiefen Temperaturen.



Abbildung 1: Die neue Experimentierhalle Ost der PETRA III Extension: Außenansicht (oben), Eingangsbereich (Mitte) und Innenansicht (unten).

Ein Kooperationsvertrag ermöglicht es nun auch Freiburger Studenten unkompliziert die Einrichtungen des DESY für Messungen und Praktika zu nutzen. Diese Möglichkeit wurde bereits in ersten

themenbezogenen Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten wahrgenommen. Die *Chemical Crystallography Beamline* wird ihren Platz in der neuen Experimentierhalle Ost haben (siehe Abb. 1). Beide Hallen der Erweiterung (Ost und Nord) wurden im Jahr 2015 fertiggestellt und schon teilweise von den Ingenieuren und Wissenschaftlern des zugehörigen Bereichs „Forschung mit Synchrotronstrahlung“ des DESY bezogen. Darunter auch der Freiburger Doktorand Carsten Richter, welcher in enger Zusammenarbeit mit dem DESY-Wissenschaftler Dr. D. Novikov an der Weiterentwicklung etablierter Röntgenmethoden arbeitet.

Das konkrete Forschungsthema der Freiburger soll einen wichtigen Beitrag zu vergleichsweise neuen Methoden der Strukturuntersuchung liefern (siehe Abb. 2). Aus der wellenlängenabhängigen Streuung von Röntgenstrahlung, bekannt als „Diffraction Anomalous Fine Structure“ (DAFS) bzw. „Anomalous Anisotropic X-ray Scattering“ (AAS) lassen sich, ähnlich wie aus der Absorption (XAFS), Parameter der unmittelbaren lokalen Umgebung der resonant angeregten Streuer gewinnen. Dabei kommt die präzise Einstellung der Wellenlänge als vielleicht bedeutendste Stärke des Synchrotrons im Vergleich zu konventionellen Röntgenquellen zum Tragen.

Die Abhängigkeit des Streuvermögens von Polarisation und Wellenlänge der elastisch gestreuten Röntgenphotonen hat ihre Ursache in der lokalen Dichte der unbesetzten Elektronenzustände. Deren Untersuchung liefert Informationen über die lokale Struktur des resonant angeregten Atoms. Aus Kombination dieses spektroskopischen Zugangs zu Nahordnungsinformationen einer Substanz mit dem Impulsübertrag der Streuung gewinnt man eine einzigartige Aussagekraft für ausgewählte periodische Teilstrukturen oder Elektronenzustände bestimmter Symmetrie. Daraus versprechen wir uns eine erhöhte Sensitivität auf anderweitig schwer zugängliche Abweichungen von der Idealstruktur und Gitterdefekte wie Leerstellen und Fehlbesetzung, welche für die Funktion vieler moderner Materialien ausschlaggebend sind.

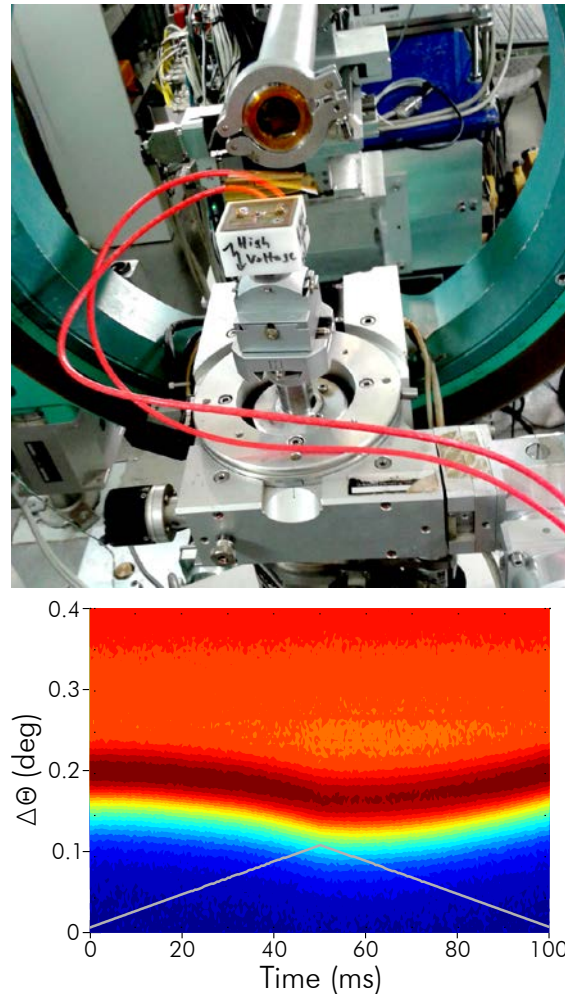


Abbildung 2: Zeitaufgelöste Kristallographie am Phasenübergang im elektrischen Feld: Messaufbau (oben) und dazugehörige Rohmessdaten der Röntgenintensität (unten).

Freiberg Zentrum für pyroelektrische Anwendungen

Nach Schätzungen unterschiedlicher Energieagenturen und Institutionen gehen heutzutage weltweit mehr als 72 % des für die technische Nutzung gewandelten Energieaufkommens in Form von Abwärme verloren. Das entspricht einer Energiemenge von 246 EJ oder 68 PWh und damit etwa dem Dreifachen des europäischen Primärenergiebedarfs. 63 % der Abwärme fällt bei Temperaturen unter 100 °C an. Diese thermische Energie geht ungenutzt als sogenannte Niedertemperaturabwärme verloren.

Das vom Institut für Experimentelle Physik initiierte und im Aufbau befindliche „Freiberg Zentrum für pyroelektrische Anwendungen“ (FZPA) hat sich zum Ziel gesetzt, diese sogenannte Niedertemperaturabwärme nutzbar zu machen. Im Fokus der Arbeiten stehen die wissenschaftliche Untersuchung, Entwicklung und technische Erprobung innovativer Ansätze zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme für Energie- und Stoffwandlungsprozesse durch Anwendung neuartiger pyroelektrischer Funktionsmaterialien (siehe Abb. 1).

Wesentliches Know-how und eine breite Infrastruktur zu pyroelektrischen Materialien wurden im Rahmen verschiedener Projekte und Kooperation innerhalb der letzte 10 Jahre aufgebaut und im FZPA gebündelt. Wichtige Meilensteine sind:

- 2007: Pyroelektrische Röntgenstrahlerzeugung mit Lithiumniobat.
- 2009–2011: BMBF-Verbundvorhaben „Biomimetische Mineralisation für die Technik (BIOMINT)“.

Im Zentrum des Vorhabens stand die Nutzung der besonderen Eigenschaften pyroelektrischer kristalliner Materialien in Verbindung mit biotechnologischen und physiko-chemischen Prozessen. Mit diesem neuartigen technologischen Ansatz wurden vielversprechende Anwendungen im Bereich der Bioverfahrenstechnik, der Umwelttechnologie und der Lebenswissenschaften erarbeitet.

- 2009: Erstmaliger Nachweis der desinfizierenden Wirkung pyroelektrischer Oberflächen.
- 2010: Erstmaliger Nachweis der eisabweisenden Wirkung pyroelektrischer Oberflächen.
- 2010: Erstmaliger Nachweis der Radikalerzeugung an pyroelektrischen Oberflächen.
- 2012–2014: ESF-Nachwuchsforschergruppe „Pyroelektrische Funktionsmaterialien für die Energie- und Stoffwandlung (PyroConvert)“. In der interdisziplinären Gruppe wurden auf Pyroelektrika basierende Konzepte für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme für Energie- und Stoffwandlungsprozesse erarbeitet.
- 2013: Messaufbau zur Bestimmung pyroelektrischer Koeffizienten mit der Sharp-Garn-Methode im Temperaturbereich von 0 °C bis 160 °C.
- 2013–2015: VIP-Vorhaben „Pyroelektrisch funktionalisierte Schichten zur aktiven Schaltung von Oberflächeneigenschaften (PyroFunk)“. Ziel war die Entwicklung und Optimierung neuartiger

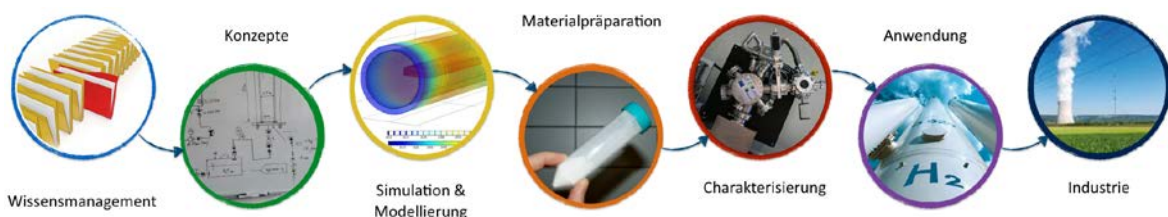


Abbildung 1: Glieder der Innovationskette, entlang derer spezifische Kompetenzen aufgebaut wurden und die mit dem „Freiberg Zentrum für pyroelektrische Anwendungen“ institutionalisiert werden.

eisabweisender Oberflächenbeschichtungen auf der Basis pyroelektrischer Materialien.

- 2013–2014: Bau eines Demonstrators zur Wasserstofferzeugung im Rahmen der ESF-Nachwuchsforschergruppe PyroConvert.
- 2014: Vakuumkammer zur Polarisierung pyroelektrischer Proben bei Spannungen bis zu 30 kV.
- 2015: Erstmaliger Nachweis von Pyroelektrizität der MFP-Phase von Strontiumtitanat mittels elektrischem Feld und Defektmigration.
- im Aufbau: UHV-Vakuumkammer zur Bestimmung pyroelektrischer Koeffizienten bei hohen Temperaturen bis 1000 °C.

Im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten stand zurückliegend auch die Desinfektion durch thermisch angeregte pyroelektrischen Materialien in wässrigen Umgebungen. Hiermit lassen sich ganz neue Desinfektionsverfahren entwickeln. Bisher ist jedoch nur wenig über die Bildung von dafür geeigneten reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) an der Oberfläche der thermisch angeregten pyroelektrischen Materialien bekannt. Dementsprechend sind umfangreiche Untersuchungen zur pyroelektrisch angetriebenen ROS-Bildung durchgeführt worden. Genutzt wurden hierfür Bariumtitanat-Nanopartikel, die sich in Kontakt mit Palladium-Nanopartikeln befanden (siehe Abb. 2). Mittels Elektronenspinresonanzmessungen und Fluoreszenzspektroskopie konnte die OH-Radikal-Generation nachgewiesen werden. Da pyroelektrische Potentialänderungen allein für die Beschreibung des Wirkmechanismus nicht ausreichen, wird ein zweistufiges Ladungstransfermodell zwischen den Palladium- und den pyroelektrischen Nanopartikeln vorgeschlagen, wobei der pyroelektrische Effekt als treibende Kraft den Ladungstransfer erleichtert. Die Arbeiten sind 2015 im „Journal of Physical Chemistry C“ erschienen.

Für spezifische Anwendungen, so auch die pyroelektrische Oberflächendesinfektion, kann es sinnvoll sein, die flexiblen Eigenschaften organischer Pyroelektrika mit den hohen pyroelektrischen Koef-

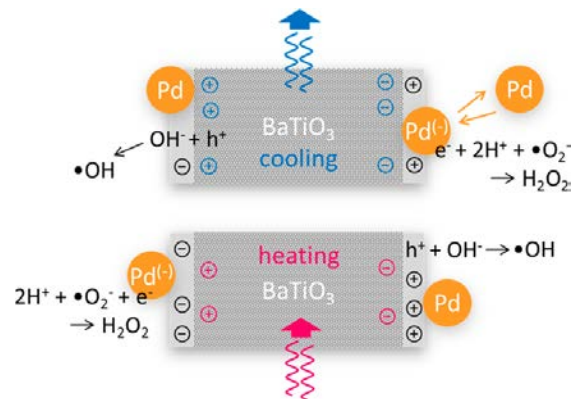


Abbildung 2: Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies an der mit Pd-Nanopartikeln belegten und thermisch angeregten Oberfläche eines pyroelektrischen Materials.

fizienten der anorganischen Pyroelektrika zu kombinieren. So wurde im Rahmen der Studienarbeit von Mandy Koitzsch die Herstellung von Oberflächenkompositen aus Lithiumniobat und Polyamid-11 (PA-11) untersucht. Hierbei wurde LiNbO₃-Pulver in eine pyroelektrische PA-11-Matrix immobilisiert, wobei die pyroelektrische Phase des PA-11 durch Schmelzkristallisation erhalten werden konnte.

Polyvinylidenfluorid PVDF und sein Co-Polymer Polyvinylidenfluorid-Trifluorethylen P(VDF-TrFE) sind weitere organische Ferro- bzw. Pyroelektrika, welche derzeitiger Forschungsgegenstand sind. Dabei wurde erstmals nachgewiesen, dass sich die bisher als paraelektrisch berichtete Hochtemperaturphase von P(VDF-TrFE) ebenfalls ferroelektrisch verhält und dabei z. T. größere pyroelektrische Koeffizienten als die ferroelektrische Tieftemperaturphase besitzt. (siehe Abb. 3)

Bei dem zunächst nicht pyroelektrisch aktiven Material SrTiO₃ konnte in vorangegangenen Röntgendiffraktometrie-Experimenten gezeigt werden, dass sich durch das Anlegen von externen elektrischen Feldern in der Größenordnung von 10⁶ V/m („Formierung“) eine verzerrte Struktur in der Nähe der Anode ausbildet, welche ein intrinsisches Dipolmoment aufweist und auf die Migration von Sauerstoffvakanz im elektrischen Feld zurückzuführen ist. Die Vermutung, dass diese sogenannte MFP-Phase („migration-induced field-stabilized polar phase“)

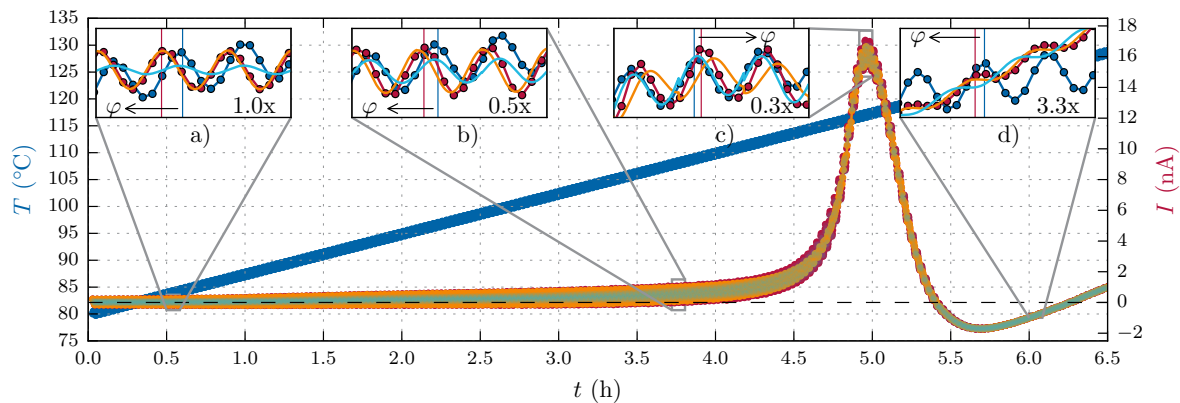


Abbildung 3: Mittels Sharp-Garn-Methode aufgenommene Strom- und Temperaturkurve von P(VDF-TrFE) über der Zeit.

auch pyroelektrisch sein könnte liegt nahe und konnte mithilfe von pyroelektrischen Messungen unter Nutzung einer modifizierten Sharp-Garn Methode nachgewiesen werden. Dabei zeigt die aus der Temperaturosillation folgende Stromoszillation einen Phasenwechsel (siehe Abb. 4), aus welchem der pyroelektrische Koeffizient extrahiert werden konnte und demnach den Nachweis liefert, dass man mithilfe von elektrischen Feldern eine zentrosymmetrische in eine nicht-zentrosymmetrische Struktur überführen kann.

Aufbauend auf diesen Arbeiten wurde mit der Arbeitsgruppe um Prof. Pietzsch (Universität Siegen) mithilfe einer stroboskopischen Röntgendiffraktometrie untersucht, ob die MFP-Phase auch die erwarteten piezoelektrischen Eigenschaften auf-

weist. Erste Ergebnisse belegen die Piezoelektrizität der MFP-Phase und zeigen, dass diese stärker ausgeprägt ist als in Quartz. Abb. 5 zeigt exemplarisch die Bewegung der Struktur unter zeitlich periodischer elektrischer Anregung am Beispiel verschiedener Braggreflexe von Strontiumtitanat und der zugehörigen MFP-Phase.

Es wurde ferner begonnen, die in den Vorjahren aufgebaute Datenbank pyroelektrischer Materialien (siehe Abb. 6) so anzupassen, dass sie über das Internet zugänglich ist. Die Fertigstellung wird in 2016 erwartet.

Einen Forschungsschwerpunkt stellte weiterhin die Untersuchung der pyroelektrischen Wasserstoffzeugung dar. Hierzu sind der aufgebaute Demonst-

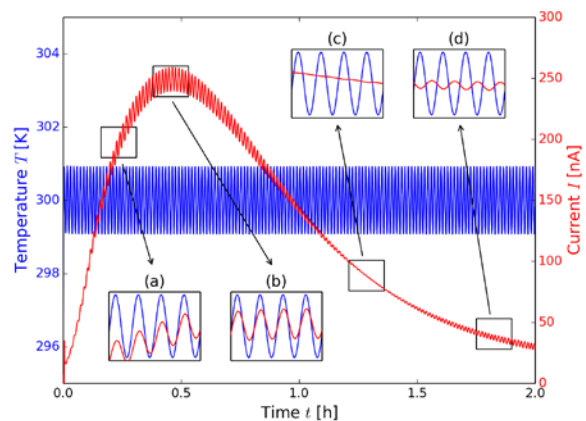
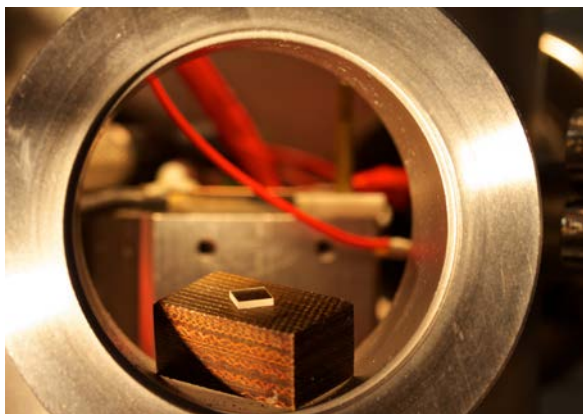


Abbildung 4: SrTiO₃-Kristall in der pyroelektrischen Messkammer (links) und Formierungsverlauf von SrTiO₃ überlagert mit Oszillationen, welche aus der sinusförmigen Temperaturanregung folgen (rechts). Der Phasenwechsel zwischen (b) und (d) lässt auf die pyroelektrische Aktivität der MFP-Phase schließen.

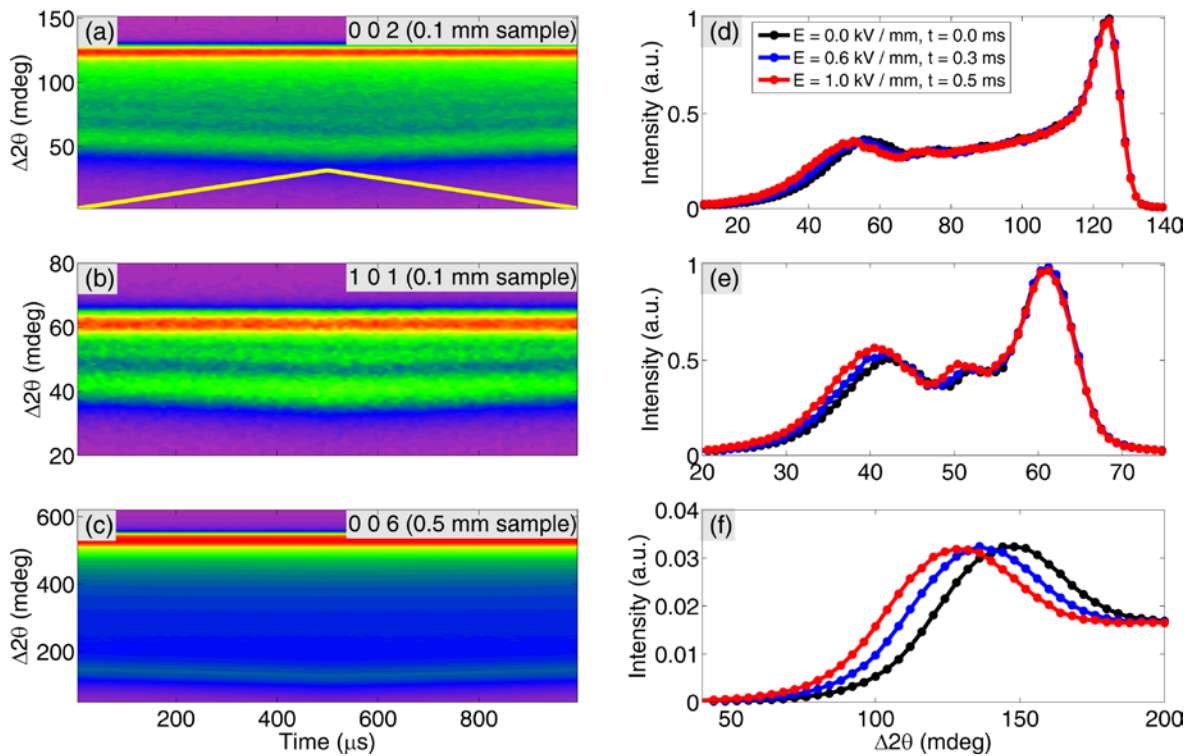


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Braggreflexintensität (Teilbilder a bis c) und Reflexlage (Teilbilder d bis f) von SrTiO_3 und der MFP-Phase bei Anregung mit externer Wechselfspannung von 1 kHz.

rator weiter optimiert und die theoretischen Grundlagen weiter ausgearbeitet worden. Es wurde ein neuer thermodynamischer Zyklus beschrieben, der im Gegensatz zu den allgemein bekannten Zyklen zur pyroelektrischen Energiegewinnung auf direktem Wege chemische Arbeit verrichtet. Hauptmerkmal des neuen pyroelektrokatalytischen Zyklus ist, dass eine von der Energielücke des Halbleiters und der Zielreaktion abhängige Spannung benötigt wird, um den Elektronentransfer herbeizuführen. Die Partikelgröße spielt dabei eine zentrale Rolle. So gibt es eine kritische Partikelgröße, unterhalb derer keine chemische Reaktion möglich ist. Bei zu großen Partikeln ist die aktive Fläche unzureichend. Es ergibt sich eine optimale Partikelgröße, die von Materialparametern wie dem pyroelektrischen Koeffizienten und der Permittivität abhängig ist. Das theoretische Modell soll durch den Betrieb des Demonstrators validiert bzw. erweitert werden. Des Weiteren ist im Frühjahr 2016 die Präsentation des Demonstrators auf der Hannover-Messe vorgesehen, um interessierte Industriepartner für externe Tests und das *Up-Scaling* im Rahmen von FuE-Projekten zu gewinnen.

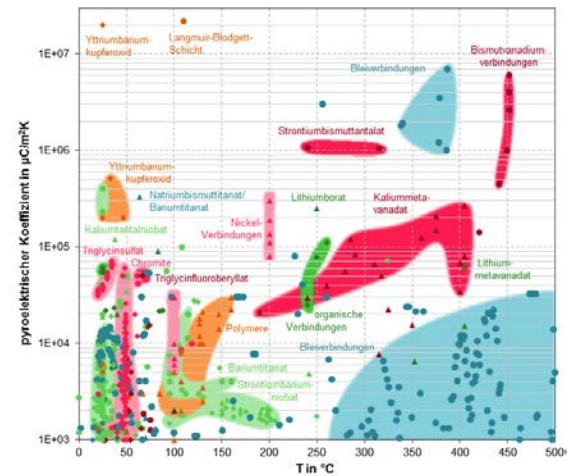


Abbildung 6: Übersicht pyroelektrischer Koeffizienten für verschiedene Materialien. Die farblich markierten Wertebereiche ergeben sich durch unterschiedliche Präparation oder Dotierung.

Die Bereitstellung der finanziellen Mittel für die Erforschung von Innovationen im Themengebiet der Pyroelektrika erfolgte durch das Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) und die Sächsischen Aufbaubank (SAB, 100109976, 100152607) sowie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (03EK3029A).

Mining-RoX – Intelligente Roboter im Bergwerk

Das Projekt Mining-RoX beschäftigt sich mit dem Einsatz intelligenter mobiler Serviceroboter im Bergbau. Durch die Forschungsarbeiten sollen diese befähigt werden, präzise 3D-Kartierungen von Bergwerken zu erstellen sowie Umgebungsbedingungen wie Luft- und Wasserqualität autonom zu erfassen. Sie bieten ein zuverlässiges Monitoring, das die Arbeitssicherheit verbessert und die Kosten für den laufenden Bergbaubetrieb reduziert.

Das Projekt, welches durch das Institut für Informatik (Prof. Bernhard Jung) koordiniert wird, ist Teil einer landesweiten Forschungsinitiative „Robots in saXony (RoX)“. Hierdurch soll das Thema Robotik im Freistaat gestärkt werden. Als Partner aus der Wissenschaftsregion ist die Hochschule Mittweida in das Projekt integriert. Das Institut für Experimentelle Physik (Prof. Dirk C. Meyer) beteiligt sich an der Konstruktion der Roboterplattformen und speziell sowohl an der Einrichtung und der Erprobung einer Röntgenanalyseeinheit für Spektroskopie und Diffraktometrie als auch am Aufbau eines Probenentnahmesystems. Die Konstruktions- und experimentellen Arbeiten werden von Marco Herrmann koordiniert. Alle Auf- und Umbauarbeiten an den Robotern werden in der mechanischen und elektronischen Werkstatt des Instituts für Experimentelle



Physik durchgeführt. Als Entwicklungs- und Erprobungsumgebung für Mining-RoX dient das Forschungs- und Lehrbergwerk „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg.

Die autonome Erhebung von 3D-Messwerten in Bergwerken soll helfen realitätsnahe 3D-Simulationen zur Bewetterung durchzuführen, die dann in die Entwicklung von flexiblen Bewetterungsteuerungen eingehen. Bei der Grubenbewetterung muss u. a. darauf geachtet werden, dass zu jedem Zeitpunkt eine ausreichende Frischluftversorgung und Luftzirkulation stattfindet. Da die Bewetterungskosten oft mindestens 25 Prozent der gesamten Abbaukosten ausmachen, lassen sich mit den Daten aus der Simulation in Zukunft Kosten einsparen; auch wenn der Bewetterungsaufwand aufgrund der immer tieferen und damit auch wärmeren und luftärmeren Abbauhazone noch steigen wird.

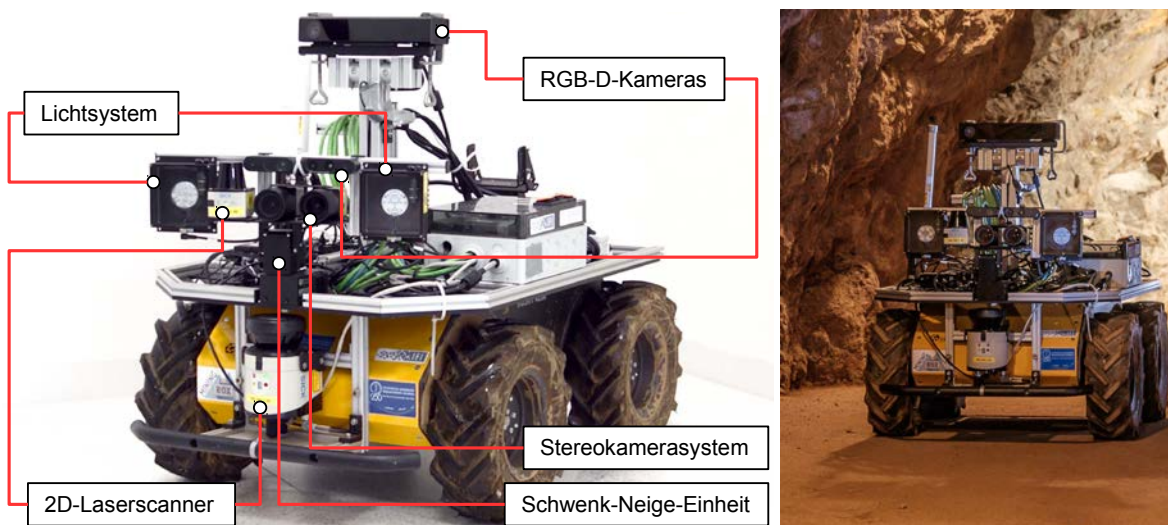


Abbildung 1: Roboter Alexander (Husky-Plattform von Clearpath Robotics) mit seinem derzeitigen sensorischen Aufbau.

Durch die Überwachung der Umgebungsbedingungen soll auch zur Sicherheit des Bergbaupersonals in der Grube beigetragen werden. Roboter sind prinzipiell für die Kontrolle einsturzgefährdeter Stollen geeignet, da der Verlust eines Roboters keine ethisch-moralische Dimension erlangt. Der Einsatz mobiler Roboter birgt so das Potential für einen qualitativen Sprung in der sensorgestützten Bergbautechnik in den Bereichen Erkundung, Abbauplanung, Betriebsoptimierung, Arbeitsschutz und Umweltmonitoring.

Weiterhin soll die Erkennung von Erzeinschlüssen oder geologischen Störungen mit geeigneten Messmethoden möglich werden. Dafür wurde ein portables Röntgenfluoreszenzspektrometer beschafft, mit dem eine qualitative und quantitative Analyse der einzelnen Bestandteile (Elemente und chemische Verbindungen) des Erzes und deren Konzentration vorgenommen werden kann. Die Messung muss dazu direkt am Stoß – der Oberfläche des Gesteins – ausgeführt werden. Hierbei greift die Hand des auf der Roboterplattform installierten Manipulatorarms das Messgerät und navigiert es an die Messstelle. Dann erfolgt die Messung und Auswertung.

Im vergangenen Jahr wurden verschiedene robotische Plattformen in Betrieb genommen: Alexander

(siehe Abb. 1), Julius (siehe Abb. 2) und Elisabeth (siehe Abb. 3). Sie sind benannt nach dem Naturforscher Friedrich Wilhelm Heinrich Alexander von Humboldt, dem Freiburger Mathematiker und Ingenieur Julius Ludwig Weisbach sowie der Schachanlage „Alte Elisabeth“, die zur Himmelfahrt Fundgrube in Freiberg gehört. Dazu wurden umfangreiche Planungs-, Entwicklungs-, Konstruktions- und Programmierungsarbeiten sowie Tests durchgeführt.

Im Rahmen der problemorientierten Projektarbeit „Quantifizierung eines Hand-RFA-Geräts für den autonomen Bergbau“ durch Thomas Naumann wurden Testmessungen im Labor durchgeführt, um die Spezifikationen und Messparameter des Spektrometers zu verifizieren sowie maximale Abweichungen von optimalen Messbedingungen zu quantifizieren. Mithilfe dieser Voruntersuchungen wurde die erforderliche Positioniergenauigkeit des Roboterarms ermittelt und die Aussagefähigkeit der später im Bergwerk erhobenen Messdaten bestimmt. Um Rückschlüsse auf die Genauigkeit der mit dem portablen Gerät gemessenen Elementkonzentrationen zu erhalten, wurden vergleichend Messungen mit einem stationären Röntgenfluoreszenzspektrometer durchgeführt. Es konnten ähnliche Messgenauigkeiten festgestellt werden. Untersuchungen zur Messzeit und Positionierung unter Verwendung

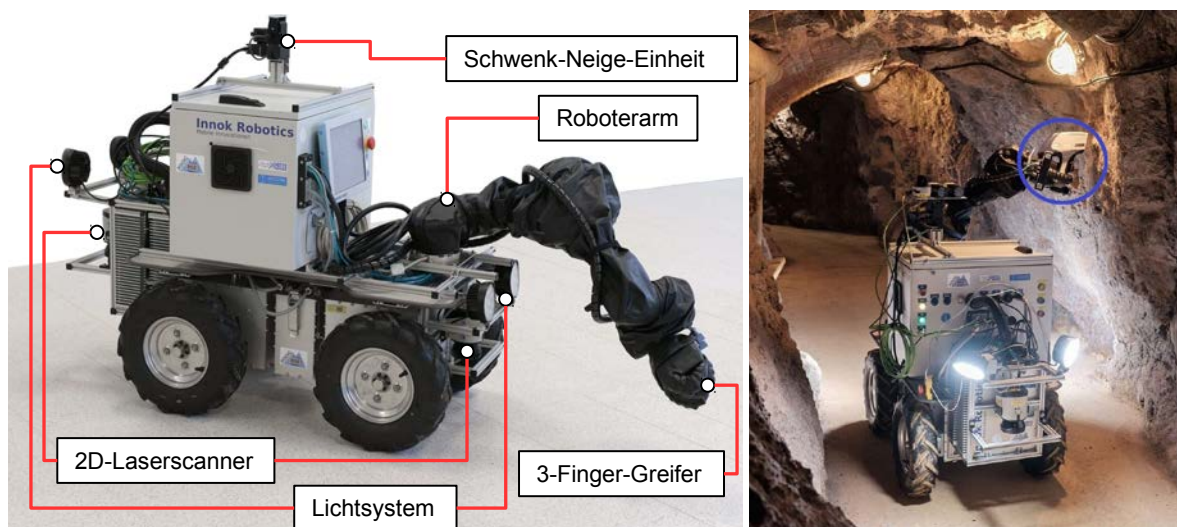


Abbildung 2: Roboter Julius mit seiner Forschungsplattform, die mit einem Roboterarm für Manipulationsaufgaben unter Tage ausgestattet ist. Julius basiert auf der Plattform Heros von Innok Robotics, welche speziell für die Bedingungen unter Tage angepasst wurde (links). Julius bei der Durchführung einer Röntgenanalyse: Der Fingergreifer des Roboterarms hält das Röntgenspektrometer (rechts).



Abbildung 3: Das robotische Boot Elisabeth ermöglicht die Datenerfassung in gefluteten Bergwerksbereichen.

verschiedener Gesteinsproben in unterschiedlichen Präparationszuständen zeigten, dass diese die Qualität der Messergebnisse entscheidend beeinflussen. So muss zukünftig unter Berücksichtigung der Akkulaufzeit des Roboters und des Spektrometers sowie der erforderlichen Genauigkeit der Messergebnisse jeweils eine optimale Messstrategie errechnet werden. Weiterhin erfolgten detaillierte Untersuchungen zur Veränderung der Röntgenstrahlintensität bei sich ändernden Messabständen und Messwinkeln mittels eines CMOS-Flächendetektors. Um die besonderen atmosphärischen Bedingungen des untertägigen Bergbaus – im Speziellen die im Forschungs- und Lehrbergwerk „Reiche Zeche“ vorhandene hohe Luftfeuchtigkeit – zu simulieren, wurden in einer Klimakammer Messungen unter hoher Luftfeuchtigkeit im Labor durchgeführt.

In einem nächsten Schritt soll ein Bewertungsalgorithmus unter Einbeziehung der Messbedingungen entwickelt werden, anhand dessen eine Interpretation der Messdaten aus dem Bergwerk vorgenommen werden kann. Ferner soll die Fernsteuerung des portablen Röntgenfluoreszenzspektrometers sowie die Echtzeitübertragung der Messdaten an die Robotersteuerung (Julius) realisiert werden. Für den Nachweis radioaktiver Strahlung wird zusätzlich ein Gamma-Spektrometer am Roboter angebracht und kalibriert. Ferner befindet sich ein System für die Wasserprobenentnahme in der Entwicklung.

Wir danken der mechanischen und elektronischen Werkstatt des Instituts für Experimentelle Physik, insbesondere Christoph Irmer, Robert Backasch und Patrick Zill, für die Durchführung der Konstruktionsarbeiten sowie dem Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) für die finanzielle Unterstützung.

Röntgenfluoreszenzanalyse zur Holzschutzmittelbestimmung an Objekten der Sammlung für Bergbaukunde

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist eine etablierte, zerstörungsfrei arbeitende Methode, bei der ein Untersuchungsgegenstand mithilfe primärer Röntgenstrahlung angeregt wird und sekundäre Röntgenstrahlung – Fluoreszenzstrahlung – emittiert. Über das Energiespektrum der Fluoreszenzstrahlung lässt sich dann auf die chemische Zusammensetzung des Untersuchungsgegenstands schließen. Die RFA findet in verschiedensten Bereichen wie Archäologie, Biologie, Chemie, Forensik, Kunst und Umweltanalytik, aber auch in der Industrie eine breite Anwendung.

Erste kommerzielle (wellenlängendispersive) RFA-Geräte kamen in den 1950er und 1960er Jahren auf den Markt. Mit der Verbesserung der Detektoren wurden in den frühen 1970er Jahren die ersten energiedispersiven Geräte kommerzialisiert. Sie ermöglichten erstmalig die gleichzeitige Aufnahme eines großen Spektralbereichs. Damit waren die Voraussetzungen für portable RFA-Geräte (pRFA) geschaffen, die den Anwendungsbereich weiter vergrößerten. Neben Analysen von Böden und Gesteinen im freien Gelände zählt heute auch das Recycling zu wichtigen Anwendungsbereichen. In den 1980er Jahren erlangten ergonomisch geformte, sogenannte Handheld-Geräte die Marktreife. Diese bestanden zunächst aus einer radioaktiven Röntgenquelle (z. B. das Isotop Fe-55) und einem Si-PIN-Detektor mit einer Energieauflösung von etwa 1200 eV. Seitdem wurde die pRFA stetig weiterentwickelt. So finden sich heute neben klassischen Röntgenröhren im Miniaturformat auch Röntgeneratoren, die den pyroelektrischen oder triboelektrischen Effekt nutzen. Diese Miniaturröntgenröhren benötigen eine elektrische Leistung von weniger als 4 W. Zudem werden hochempfindliche Siliziumdrift-detektoren (SDD) mit einer Energieauflösung von besser als 140 eV eingesetzt. Mit diesen Systemen können auch ganz neue Einsatzbereiche erschlos-



Abbildung 1: Bestimmung der chemischen Zusammensetzung an verschiedenen Modellen der Sammlung mithilfe des portablen RFA-Geräts durch Dipl.-Ing. (FH) Marco Herrmann und B. Sc. Thomas Naumann.

sen werden. Beispielsweise wird im Rahmen des Forschungsvorhabens Mining-RoX (siehe S. 68) ein pRFA-Gerät für Erkundungen im Bergbau durch autonome Roboter qualifiziert.

Im Rahmen der problemorientierten Projektarbeit „Quantifizierung eines Hand-RFA-Geräts für den autonomen Bergbau“ von Thomas Naumann wurde das dafür eingesetzte kommerzielle pRFA-Gerät umfangreichen Tests unterzogen. Neben dem Vergleich mit einem Laborgerät, verschiedenen Mess- und Umgebungsparametern erfolgten auch Referenzmessungen an unterschiedlichen Untersuchungsgegenständen. Einer der Tests bestand in der Identifizierung von Holzschutzmitteln an Objekten der Sammlung für Bergbaukunde der TU Bergakademie Freiberg.

Die Sammlung für Bergbaukunde hat eine herausragende Stellung unter den historischen Sammlungen der Bergakademie. Sie besteht aus detailreichen Bergbau- und Hüttenmodellen, originären Werkzeugen und Hilfsmitteln, einmaligen Schriftstücken und Bildnissen sowie wertvollen archäologischen Grubenfunden. Jedoch ist der Erhaltungszustand vieler Objekte schlecht, die Modelle weisen zum Teil erhebliche und gesundheitlich bedenkliche Belastungen mit Holzschutzmitteln auf. Diese Objekte sind museal sowie in Forschung und Lehre nicht nutzbar. Erste Holzschutzmitteluntersuchungen erbrachten den Nachweis vielfältiger Belastungen des Bestands. Die Erkenntnisse waren jedoch nicht ausreichend, um Rückschlüsse auf den Belastungsgrad der gesamten Sammlung zu erhalten. Eine weitere, umfangreiche Untersuchung zur Feststellung der qualitativen und quantitativen Belastung der Modelle sollte die Informationsbasis für erforderliche Maßnahmen vervollständigen.

Die dafür erforderlichen RFA-Messungen wurden in enger Zusammenarbeit mit der Kustodie (Dipl.-Rest. Hendrik Naumann) und dem Restaurator Dipl.-

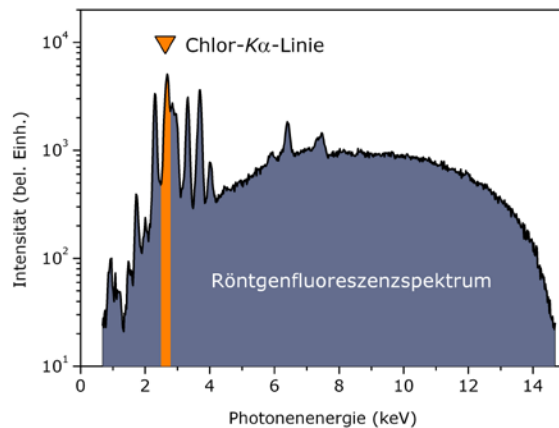


Abbildung 2: Röntgenfluoreszenzspektrum des in Abb. 1 (oben) vermessenen Objekts. Deutlich zu erkennen ist die Cl-K α -Linie, die auf chlorhaltige Holzschutzmittel hinweist, mit denen das Objekt behandelt wurde.

Rest. Karsten Püschner geplant und durchgeführt. An 26 ausgewählten Objekten und insgesamt 60 unterschiedlichen Messpositionen erfolgten die spektroskopischen Untersuchungen (siehe Abb. 1). Dabei konnten beispielsweise die Elemente Arsen und Chlor (siehe Abb. 2) mit signifikanten Anteilen nachgewiesen werden. Letzteres findet sich in Insektiziden wie Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) und γ -Hexachlorcyclohexan (Lindan) und ist ein Beleg für die Behandlung der Objekte mit dem Holzschutzmittel Hylotox 59.

Die Messungen sowie weitere Initiativen innerhalb der Universität halfen, ein Restaurierungskonzept schlüssig vorzubereiten und schließlich bei der Hermann-Reemtsma-Stiftung im Rahmen der Initiative „Kunst auf Lager“ eine Förderung für ein komplexes Restaurierungsvorhaben in Höhe von 36.675 € zu erhalten. Im Ergebnis dieses Vorhabens sollen die Objekte wieder vielfältig nutzbar sein. Der Arbeitserfolg an weniger belasteten Objekten soll projektbegleitend durch weitere RFA-Messungen belegt werden. Die Fertigstellung der restauratorischen Arbeiten ist für Ende 2017 avisiert.

VIP-Vorhaben Pyro-Funk

Pyroelektrizität ist die Eigenschaft bestimmter Materialien, auf eine Temperaturänderung mit einer Änderung der Oberflächenladung zu reagieren. Diese Eigenschaft, die bisher vorwiegend in der Sensorik Anwendung findet, wird im Rahmen einer VIP-Förderung des BMBF für eine neuartige Oberflächenbeschichtung auf der Basis pyroelektrischer Materialien genutzt. In ihrem grundsätzlichen Aufbau ist die Beschichtung gleichermaßen geeignet, desinfizierend zu wirken und Oberflächen eisfrei zu halten. Die Entwicklungsarbeiten in Pyro-Funk konzentrieren sich auf ein Demonstrations-Beschichtungssystem, mit dem die Ausrüstung vereisungsgefährdeter Oberflächen (Autoscheiben, Sichtgläser) möglich wird.

Das VIP-Vorhaben Pyro-Funk – pyroelektrisch funktionalisierte Schichten zur aktiven Schaltung von Oberflächeneigenschaften – wurde zusammen mit dem Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden durchgeführt und im November 2015 abgeschlossen. In Freiberg wurden dazu u. a. Beschichtungen auf Basis von LiNbO_3 , LiTaO_3 und BaTiO_3 entwickelt und charakterisiert. Um für viele anwendungsnahe Materialien Aussagen treffen zu können, wurden Edelstahl und Silizium als zwei ty-

pische Substratmaterialien ausgewählt. Um schon bei niedrigen Herstellungstemperaturen kristalline Schichten zu erhalten, wurde das Substrat zuerst mit einem *Dip-Coating*-Verfahren beschichtet und anschließend mit einem *Air-Brush*-Verfahren ein bereits kristallines pyroelektrisches Pulver aufgebracht.

Die Morphologie dieser Proben wurde umfangreich mit Rasterelektronenmikroskopie untersucht und ist für enteisende Beschichtungen gut geeignet (siehe Abb. 1). Allerdings gibt es einige Sole, die zur Rissbildung neigen. Die Benetzung der Substrate ist mit ca. 99 % optimal und kann durch die Viskosität des Sols im *Dip-Coating*-Verfahren auf nahezu jede gegebene Oberflächenrauigkeit des Substrats eingestellt werden.

Die Bestimmung von Topographie (AFM) und Oberflächenpotential (EFM) per Rasterkraftmikroskopie zeigte an einer Probe aus Solvay-P(VDF₇₀-TrFE₃₀) auf Ti-beschichtetem Glas (siehe Abb. 2), dass in dem Polymer, wie erwartet, nur die Sphärolithe ein elektrisches Signal zeigen. Die zwischen den Sphärolithen, von ca. 2 μm Größe, befindlichen amorphen Bereiche weisen dagegen kein pyroelektrisches Potential auf.

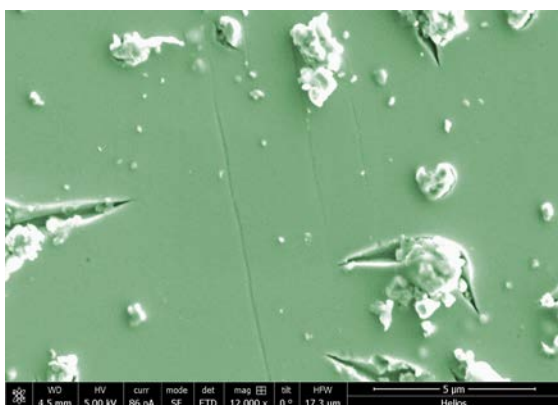


Abbildung 1: Beispiel einer REM-Untersuchung an einer Bariumtitanat-Airbrush-Schicht. Auf der Sol-Gel-Schicht sind deutlich die aufgespritzten Partikel zu sehen. Sie sind unbedeckt auf der Oberfläche eingebunden, womit der Anteil an pyroelektrisch wirksamer Phase an der Oberfläche deutlich erhöht ist.

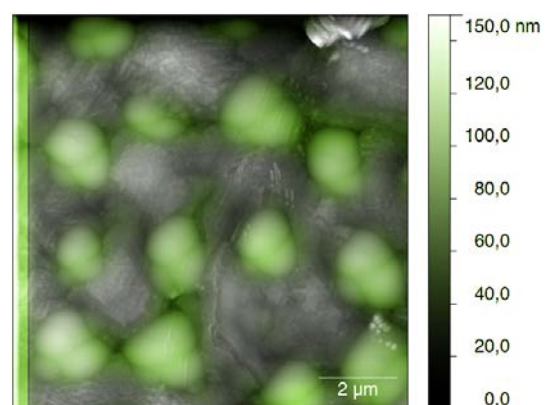


Abbildung 2: Rasterkraftaufnahme einer Probe aus Solvay-P(VDF₇₀-TrFE₃₀) auf Ti-beschichtetem Glas, wobei eine Überlagerung aus Topographie (grau) und elektrischem Potential (grün) dargestellt ist.

Virtuelles Institut MEMRIOX

Im Virtuellen Institut „Memristive Effects in Ion Beam Modified Oxides“ (VI MEMRIOX, Förderkennzeichen VH-VI-442) arbeitet das Institut für Experimentelle Physik gemeinsam mit den Projektpartnern des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf, der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der Technischen Universität Chemnitz und dem Forschungszentrum Jülich an der Erforschung und Entwicklung zukünftiger nichtflüchtiger Datenspeicher auf Basis des Widerstandsschaltens in Metalloxiden. Ziel des Projekts ist, durch die gezielte lokale Modifikation der atomaren Ordnung im Oxid und an den Grenzflächen zu den Elektroden das resistive Schalten zu beeinflussen. So soll die Erzeugung von leitfähigen, schaltbaren Pfaden kontrolliert durch Ionenimplantation erreicht werden, anstatt einen zufälligen elektrischen Durchbruch in der Zelle zu erzeugen. Somit kann das Widerstandsschalten idealerweise ohne initiale Elektroformierung eingestellt werden und damit längere Speicherzeiten und höhere Zyklenstabilitäten erreicht werden.

Resistiv schaltende Speicherzellen bestehen aus einer Metall-Isolator-Metall (MIM) Kondensator-Struktur und werden im Zentralen Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg auf (100)-orientierten Silizium-Substraten hergestellt. Die Prozessierung umfasst eine thermische Oxidation der Wafer sowie die Abscheidung der TiN-Bodenelektrode durch reaktives Magnetronspütern. Das eigentliche Speicheroxid wird mittels Atomlagenabscheidung hergestellt. Durch dieses Verfahren können Schichten

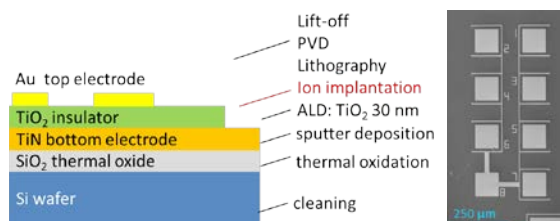


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus und der Prozessierungsschritte für MIM-Strukturen (links) sowie eine Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme von Gold-Elektroden auf einer ALD-TiO₂-Schicht (rechts). Die Kontaktflächen sind jeweils $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ groß.



mit Atomlagen-genauer Kontrolle der Schichtdicke im Bereich weniger Nanometer und, im Falle ternärer Oxide, auch der Kationenzusammensetzung hergestellt werden. Die Deckelektrode besteht aus Gold und wird durch thermisches Verdampfen und *Lift-off*-Lithographie aufgebracht und strukturiert. Für elektrische Messungen werden $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ große Kontaktflächen verwendet. Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau und die dazu notwendigen Prozessschritte. In Abb. 1 ist dazu eine Rasterelektronenmikroskopieaufnahme der Gold-Deckelektroden auf einem TiO₂-Speicheroxid gezeigt.

Durch Edelgas-Ionenimplantation kann eine bestimmte Konzentration an Punktdefekten gezielt erzeugt werden, ohne die Struktur im Ganzen zu beschädigen oder die Stöchiometrie des Oxids zu verändern. Die Auswirkungen der Punktdefekte auf die elektrischen Transporteigenschaften binärer und ternärer Oxide werden im Rahmen des VI MEMRIOX in der Promotion von Solveig Rentrop untersucht, da die defektgestützte Leitfähigkeit eines Dielektrikums ausschlaggebend für den Verlauf einer Elektroformierung und für das resistive Schalten selbst ist.

Während die strukturellen Eigenschaften des SrTiO₃ bis hin zu sehr hohen Ionisationsdosen stabil bleiben, wird für den Leckstrom eine deutliche Zunahme über Pool-Frenkel-Defektleitfähigkeit deutlich. Abb. 2 zeigt in der linken Abbildung die Photoelektronenspektroskopie des Ti 2p Peaks für SrTiO₃ nach Ionenstrahlmodifikation. Die Schulter des Peaks zu niedrigeren Bindungsenergien entspricht einer Reduktion des Ti⁴⁺, welche erst für sehr hohe Ionenfluenzen $> 10^{16}$ Ionen/cm² auftritt. Die Strom-Spannungs-Kennlinien in der rechten Abbildung zeigen dagegen deutlich, dass die durch Ionenimplantati-

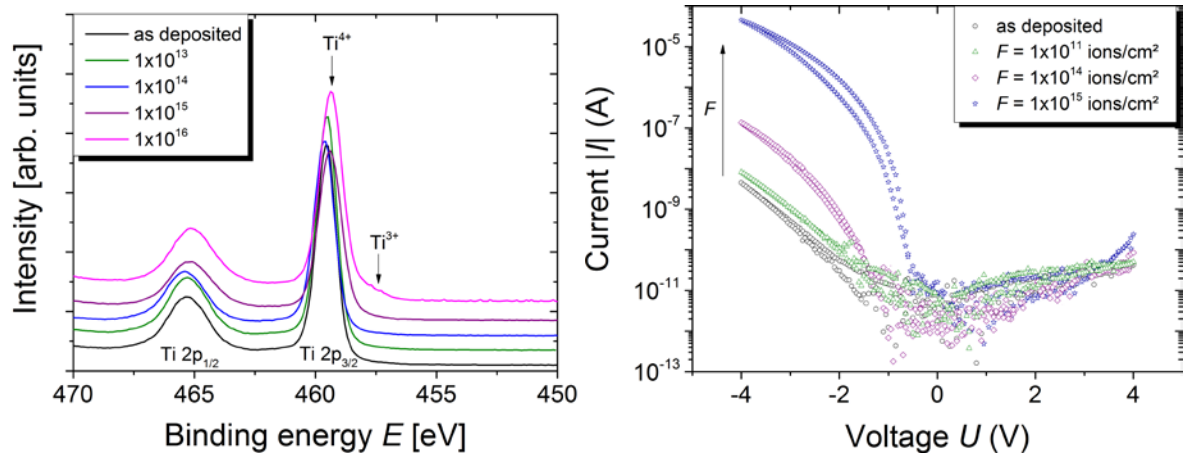


Abbildung 2: XPS-Spektren der Ti 2p Peaks für TiO_2 nach Ionenstrahlmodifikation (links) sowie Strom-Spannungs-Kennlinien für TiN - $SrTiO_3$ -Au-Kondensatorstrukturen nach Implantation von 40 keV Kr^+ (rechts).

on erzeugten Punktdefekte schon für Fluenzen von 10^{14} Ionen/cm² die Leitfähigkeit des Oxides deutlich erhöhen.

Wir danken unseren Partnern für die gute Zusammenarbeit und der Helmholtz-Gemeinschaft für die finanzielle Unterstützung.

Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung

Erfolgreicher Wettbewerb auf Bundesebene

Im Zeitraum der Jahre 2012 bis 2015 beteiligte sich die TU Bergakademie Freiberg mit einem Antrag für ein „Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung“ (ZeHS) am Wettbewerb um eine Förderempfehlung für Forschungsbauten an Hochschulen gemäß Art. 91b GG. Nach der erfolgreichen Verteidigung vor dem Wissenschaftsrat und der Bestätigung durch die gemeinsame Wissenschaftskonferenz des Bundes und der Länder stehen der Universität in den Jahren 2015 bis 2020 41,5 Mio. Euro für die Baukosten und die Beschaffung ausgewählter Großgeräte zur Verfügung.

Im Rahmen des bundesweiten Wettbewerbs soll für exzellente und national bedeutsame Forschungsprogramme an Hochschulen die bauliche Infrastruktur mit einem Gesamtvolumen in Höhe von knapp 367 Mio. Euro bis 2020 gefördert werden, um so die Voraussetzungen der Hochschulen im nationalen und internationalen Vergleich weiter zu verbessern. Die Förderung der Vorhaben unterliegt strengen Kriterien. Wichtigste Voraussetzungen sind, dass sich diese durch herausragende wissenschaftliche Qualität auszeichnen und die Forschungsprogrammatische von überregionaler und nationaler Bedeutung ist.

Zum mehrstufigen Antragsverfahren gehörten die Vorlage einer Antragskizze wie auch eines umfangreichen Vollertrags beim Wissenschaftsrat, wobei der Bergakademie in allen Schritten vollste Unterstützung durch das Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) zu Teil wurde. Eine wichtige Rolle für die Auswahlentscheidung spielte die am 4. März 2015 von Prof. Dirk C. Meyer als Sprecher des ZeHS und federführendem Verfasser der Antragsdokumente erfolgreich absolvierte Verteidigung des Vorhabens vor Vertretern des Wissenschaftsrats in Bonn. Am 24. April 2015 veröffentlichte der Wissenschaftsrat seine Förderempfehlung zugunsten des ZeHS, in deren Rahmen er der Forschungsprogrammatische sehr hohe nationale Bedeutung beimaß, da diese einen technologisch und wirtschaftlich sehr relevanten Beitrag zum Thema der Energiewende



ermöglicht. Schließlich bestätigte die Gemeinsame Wissenschaftskonferenz aus Bund und Ländern diese Empfehlung am 19. Juni 2015. Eine wichtige Basis für die Forschungsprogrammatische bilden u. a. in Freiberg bearbeitete Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie durch den Freistaat Sachsen finanzierte Verbundforschungsvorhaben. In erster Linie sind dies die DFG-Sonderforschungsbereiche 920 „Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration – ein Beitrag zu Zero Defect Materials“ (Sprecher Prof. Christos Anziris) bzw. 799 „TRIP-Matrix-Composite“ (Sprecher Prof. Horst Biermann), das Innovationskompetenzzentrum „Virtuelle Hochtemperatur-Konversionsprozesse – VIRTUHCON“ (Sprecher Prof. Bernd Meyer) sowie der Spitzentechnologiecluster ADDE des Freistaats Sachsen (Sprecher Prof. David Rafaja).

Bündelung vorhandener Kompetenzen

Mit der Etablierung des ZeHS folgt die TU Bergakademie Freiberg ihrem Hochschulentwicklungsplan 2020, Forschung und Lehre über die gesamte Wertschöpfungskette weiter zu vernetzen. Dabei wird eine lückenlose Verknüpfung, ausgehend von der Theorie über den Laborversuch, die Technikkums- und Pilotversuchsanlage bis hin zur Großversuchstechnik in einer für die industrielle Nutzung erforderlichen skalenmäßigen Auslegung, angestrebt. Der Forschungsbau ermöglicht die strukturelle Bündelung der an der TU BAF in den Bereichen Hochtemperatur(HT)-Prozesse und -Materialien in einzigartiger Weise vorhandenen Kompetenzen. Die HT-Stoffwandlung umfasst dabei alle Prozesse, die bei Temperaturen oberhalb von etwa 500 °C ablauf-

fen. Der Fokus des ZeHS liegt auf der Entwicklung innovativer, ressourcen- und energieeffizienter Technologien im Bereich der Grundstoffindustrie, wobei Prozess- und Materialanforderungen in der chemischen Industrie, der Metallurgie sowie der Keramik-, Glas- und Baustoffindustrie zusammenhängend betrachtet werden und die Ergebnisse auch auf andere Branchen übertragbar sind.

Maßgebliche Beiträge zur Energiewende

In seiner o. g. Empfehlung zur Förderung des Vorhabens unterstreicht der Wissenschaftsrat die erhebliche strategische Bedeutung der Steigerung von Ressourcen- und Energieeffizienz im Zusammenhang mit der Energiewende. Hier kommen der flexibleren Nutzung erneuerbarer Ressourcen und der Schaffung geschlossener Stoff- und Energiekreisläufe sowie der Ausrichtung von Industrieprozessen auf zeitlich fluktuierende Angebote an Überschussenergie – insbesondere aus Solar- und Windkraft – unter Einbeziehung der Energiespeicherung besondere Bedeutung zu. Dabei stehen die Anforderungen an Prozesse und Materialien im unmittelbaren Zusammenhang. Die Entwicklungs- und Prozessketten erstrecken sich von den Grundlagen bis zu den Anwendungen in industrieskalierten Pilotanlagen. Das ZeHS soll im Ergebnis den Verbleib der ressourcen- und energieintensiven Grundstoffindustrie in Deutschland unterstützen; strategisch werden auch Neuansiedlungen angestrebt.

Strukturelle Kennzeichen

Das ZeHS ist im Rahmen der interdisziplinären Arbeitsgegenstände der Forschungsprogrammatische für alle Professuren der Bergakademie offen, womit deren Mitarbeiter die mit dem Forschungsbau geschaffene Infrastruktur und die Zentrallabore kooperativ in Anspruch nehmen können. Die Professuren verbleiben an ihren Instituten, um die Verflechtung mit den Fakultäten zu erhalten. Die Forschungsinfrastruktur wird durch das Prozess- und Materialtechnikum des ZeHS abgerundet. Zur Umsetzung der Forschungsprogrammatische des ZeHS wurde eine gleichnamige Zentrale Einrichtung gegründet. Eingeschlossen ist die Unterstützung von Aufgaben in Lehre und Weiterbildung. Das Rektorat verabschiedete nach Anhörung des Senats eine entsprechende

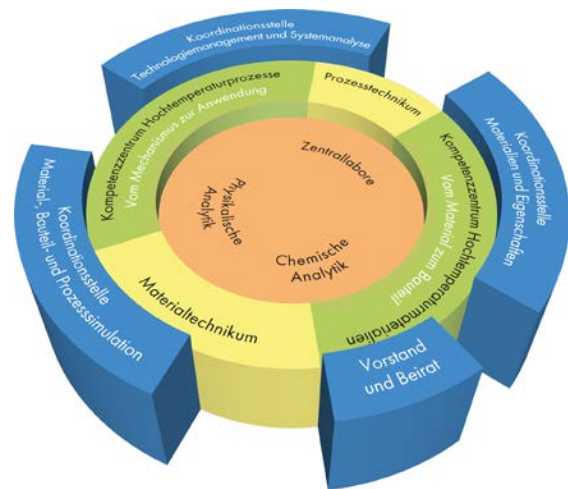


Abbildung 1: Schema der Teilbereiche des ZeHS.

Ordnung, welche Einzelheiten zur Struktur und zur Arbeit des Zentrums regelt.

Kompetenzzentren „Hochtemperaturprozesse“ und „Hochtemperaturmaterialien“

Die Forschungsschwerpunkte des ZeHS werden durch die zwei komplementären Kompetenzzentren „HT-Prozesse – Vom Mechanismus zur Anwendung“ sowie „HT-Materialien – Vom Material zum Bauteil“ vertreten. Diese beiden Kompetenzzentren sollen die wissenschaftlichen Entwicklungslinien des ZeHS geschlossen bearbeiten. Sie umfassen jeweils mehrere Arbeitsgruppen; spezifische Quervernetzungen sind vorgesehen. Die angestrebte Gliederung des Forschungsbaus in ein gemeinsames Büro- und Laborgebäude sowie die Hallen für das Prozess- und Materialtechnikum schaffen die infrastrukturellen Voraussetzungen für die Bearbeitung der übergreifenden wissenschaftlichen Fragestellung.

Im Kompetenzzentrum „HT-Prozesse“ werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS zu Technologien für effiziente HT-Prozesse hin zu chemischen HT-Prozess-Reaktoren und allgemein HT-Prozess-Anlagen gebündelt, die für die Erzeugung der meisten industriellen Grundstoffe (z. B. Metalle, Keramik, Glas und Basischemikalien) von essentieller Bedeutung sind. Allgemein soll die HT-Prozesstechnik dahingehend weiterentwickelt werden, dass deren Ressourceneffizienz bei gleichzeitiger Erhöhung der Energiedichte entscheidend gesteigert

werden kann. Mittel- bis langfristig soll die vorhandene Expertise zu chemischen Reaktoren und Öfen der Thermoprozesstechnik mit dem Ziel, ein umfassendes Stoff-, Prozess-, Material- und Modellierungswissen der beteiligten Fachdisziplinen für eine neue Generation von HT-Prozessen bereitzustellen, zusammengeführt werden.

Im Kompetenzzentrum „HT-Materialien“ werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS für synthetische feuerfeste Materialien gebündelt. Diese bilden die Voraussetzung für den Aufbau der Prozessumgebung bei allen maßgeblichen HT-Prozessen. Die Forschungsprogrammatische des Kompetenzzentrums HT-Materialien folgt umfassend dem ausgesprochen breiten Anforderungsspektrum bezüglich der Eigenschaften der HT-Materialien für eine deutliche Verschiebung ihrer Belastungsgrenzen und neue Anwendungsfelder. Die Kategorie der HT-Materialien ist, außer durch eine hohe Schmelztemperatur, zugleich durch große, auch das dynamische Verhalten betreffende, mechanische Festigkeitsanforderungen im gesamten Temperaturbereich des Einsatzes charakterisiert. Es ist vorgesehen, alle Einzelbereiche von der Ressourcenverfügbarkeit über technologische Fragen, etwa zur Füge-technik, bis hin zum Recycling, geschlossen abzubilden.

Koordinationsstellen

Die beiden Kompetenzzentren bilden zusammen mit drei Koordinationsstellen die fachliche Gliederung des ZeHS. Die Koordinationsstellen „Materialien und Eigenschaften“, „Material-, Bauteil- und Prozesssimulation“ und „Technologiemanagement und Systemanalyse“ koordinieren einerseits die methodischen Kompetenzen sowie die Geräteinfrastruktur innerhalb des ZeHS, insbesondere für die geplanten Zentrallabore Physikalische und Chemische Analytik. Außerdem begleiten sie Verbundforschungsvorhaben mittels betriebswirtschaftlicher Methoden. Sie fungieren andererseits als Schnittstellen für die Integration der an den Instituten der Bergakademie vorhandenen Kompetenzen in der Materialanalytik, Synthese, Modellierung, Simulation wie auch in den Wirtschaftswissenschaften und fördern fakultätsübergreifend den interdisziplinären Austausch. Die Koordinationsstelle „Technologiemanagement und

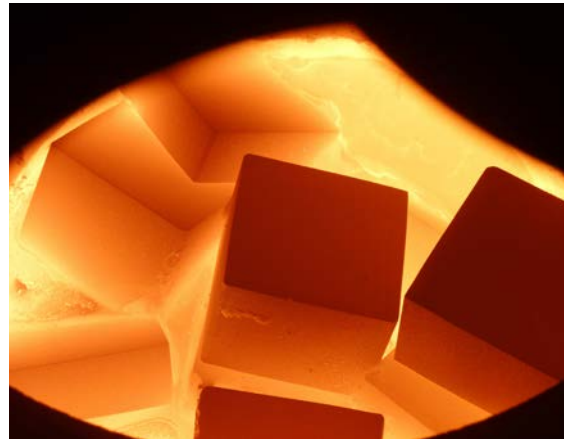


Abbildung 2: Stahlgussimulator zum Aufschmelzen von Stahlstücken sowie Umfüllen der Schmelze am IKGB.

Systemanalyse“ hat neben der Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung ressourcen- und energieeffizienter HT-Prozesse Aufgaben im Innovationsmanagement und Wissenstransfer. Darüber hinaus sind die Koordinationsstellen logistische Ansprechpartner für Kontakte mit dem ZeHS und externen wissenschaftlichen Einrichtungen sowie für den Wissenstransfer in industrielle Anwendungen.

Prozess- und Materialtechnik

Darüber hinaus sollen zwei Hallen für ein Prozess- und ein Materialtechnikum als kooperativ genutzte Infrastrukturen gebaut werden. Durch die Großgeräte im Prozess- und Materialtechnikum kann die Forschungsinfrastruktur der TU BAF zu geschlossenen Prozessketten integriert werden. Das Prozess-technikum gliedert sich dabei in ein Synthese- und ein Ofentechnikum sowie ein Korrosions- und Nitrierlabor mit jeweils verschiedenen Geräten und Versuchsständen. Im Materialtechnikum soll das Kernstück einer pulvermetallurgischen Fertigungslinie für HT-Materialien bzw. refraktäre Verbundwerkstoffe abgebildet werden.

Ausbau der Studienangebote

Die TU BAF plant im Zusammenhang mit der Forschungsprogrammatische des ZeHS die Einrichtung interdisziplinärer Bachelor- und (internationaler) Masterstudiengänge. Damit soll die internationale Verankerung des ZeHS im Bereich der Lehre sowie die Entwicklung profilierten wissenschaftlichen Nachwuchses gewährleistet werden.

Bauliche Realisierung

Der Forschungsbau soll in den Jahren 2016 bis 2020 zentral auf dem Campus der TU BAF errichtet werden. Die Gesamtkosten von 41,51 Mio. € lassen sich in Baukosten (28,67 Mio. €), Kosten für die Anschaffung von Großgeräten (9,75 Mio. €) und Kosten für die Erstausrüstung (3,09 Mio. €) einteilen. Das Gebäude soll eine Gesamtfläche von 6.011 m² aufweisen, welche u. a. Büroräume, Laborflächen, Versuchshallen und einen Computerpool umfasst. Im Zusammenhang mit der anteiligen Übernahme der Finanzierung durch den Freistaat Sachsen, die die Hälfte der Baukosten ausmacht, wurde durch das Sächsische Staatsministerium für Finanzen mit Datum vom 27. Mai 2015 bereits der Planungsauftrag gegenüber dem SMWK erteilt. Die organisatorische Verantwortung für die inhaltliche Planung, Nutzung und den Betrieb des Forschungsbaus liegt beim Direktor/Sprecher und dem Vorstand des ZeHS. Der Forschungsbau schafft Platz für bis zu 145 wissenschaftliche und 33 nichtwissenschaftliche Mitarbeiter.

Startpunkt und Ausblick

Am 9. Juli 2015 fand die erste Mitgliederversammlung des ZeHS statt. Dort wurden die nächsten Schritte erörtert, die neben der Vorbereitung von Verbundforschungsvorhaben für das ZeHS insbesondere in der Konkretisierung der Bauplanungen bestehen. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte eine erste Bauberatung mit Vertretern des SMWK, der TU Bergakademie Freiberg und des Staatsbetriebs Sächsisches Immobilien- und Baumanagement. Absprachen zum weiteren Vorgehen betreffen in erster Linie die Erarbeitung und Genehmigung entsprechender Entscheidungs- und Entwurfsunterlagen sowie die Erstellung eines Gebäudeentwurfs. Der Baubeginn ist für Ende des Jahres 2016 vorgesehen. Mit dem Ende der Bauausführung ist Mitte des Jahres 2020 zu rechnen.

Veranstaltungen

Bericht zur 2. Internationalen Freiburger Tagung zu Energiespeichermaterialien (EStorM)

Neue Materialien für zukünftige Energiespeicherkonzepte waren der Schwerpunkt der 2. Internationalen Freiburger Tagung zu Energiespeichermaterialien (EStorM), die am 11. und 12. Juni 2015 von der TU Bergakademie Freiberg ausgerichtet wurde. Dabei kamen erneut Vertreter aus Industrie und Forschung zusammen, um gemeinsam Fragen rund um neuartige elektrochemische Energiespeicher zu diskutieren.

Politik und Gesellschaft treiben die Energiewende voran und die installierte Leistung bei Solar- und Windkraft wächst kontinuierlich, sodass die bereitgestellte Leistung steigt und regelmäßig Tagesrekorde der eingespeisten Energie gebrochen werden. Angebot und Nachfrage fallen jedoch vermehrt zeitlich auseinander. Geeignete Speicher sind in der Lage, dies auszugleichen. Lithiumbatterien stehen bisher im Vordergrund der Forschungsaktivitäten und finden sich nun auch zunehmend in stationären Speichern.

Betrachtet man jedoch die Prognosen des Lithiumbedarfs (bisher großteils für Glas, Schmiermittel, Metalllegierungen verwendet) und berücksichtigt die Lithiumreserven, wird ersichtlich, dass zukünftig neue Speicherkonzepte nötig sind. Um solche zu entwickeln, ist ein systematisches Herangehen bei der Materialauswahl zielführend. Als Ressourcenuniversität verfügt die Bergakademie Freiberg auf diesem Weg über eine in ihrer Geschlossenheit wohl einzigartige Innovationskette, ausgehend von der Mineralogie und Kristallographie über die Festkörperphysik und Chemie bis hin zur Werkstoffwissenschaft und -technologie.

Mit der 2. EStorM-Konferenz sollte die in Freiberg erfolgreich etablierte Plattform zu elektrochemischen Energiespeichermaterialien und für den inspirierenden, interdisziplinären und branchenübergreifenden Austausch mit internationalen Experten fortgeführt werden. Nachdem bei der EStorM 2013 die einzel-

nen Komponenten elektrochemischer Energiespeicher, Herstellungsverfahren und Einsatzgebiete im Vordergrund standen, bildeten Methoden zur systematischen Bestimmung neuer Materialien und neue Konzepte für elektrochemische Energiespeicher sowie Einblicke in die *In-situ*-Charakterisierung den Schwerpunkt der Tagung 2015.

Die Einbeziehung der Rohstoffsituation, Trends und Herausforderungen neuer Märkte sowie neuartige Anwendungen schlossen den Themenkreis dieser Tagung, insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung zukünftiger Energiespeicherlösungen. Dafür konnten erneut Experten als Referenten aus dem In- und Ausland gewonnen werden, mit denen die 70 Tagungsgäste in Austausch traten. Über Teilnahme-Stipendien wurde es auch den Freiburger Studenten ermöglicht an diesem Austausch teilzunehmen.

Als Universitätsstadt – mit der ältesten montanwissenschaftlichen Hochschule der Welt – und innovativer Wirtschaftsstandort bot Freiberg für diese Konferenz einen geeigneten Rahmen. Die 2. EStorM-Konferenz wurde von der Bergakademie Freiberg in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Technologiezentrum Halbleitermaterialien Freiberg, dem Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden, dem Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg sowie dem Netzwerk Energy Saxony ausgerichtet. Die Ergebnisse und Diskussionen des zweitägigen Treffens werden in einem Konferenzband des renommierten Verlags AIP *Proceedings* zusammengefasst.





Jubiläumsjahr 2015

Zum 250. Universitätsjubiläum präsentierte sich die Universität bei einer Jubiläumsnacht der Wissenschaft und Wirtschaft am 20. Juni von 18 bis 24 Uhr in der Freiburger Innenstadt. Sechs Wissenschaftsmeilen der Fakultäten mit über 100 Präsentationen, zahlreichen Experimenten, Vorführungen und Vorträgen zu Wissenschaft und Forschung, begleitet von Programmen auf vier Bühnen waren der Kern des umfangreichen Programms.

Das Institut für Experimentelle Physik beteiligte sich mit drei Pavillons und dem „kleinsten Hörsaal der Welt“ an der Wissenschaftsmeile der Fakultät 2 unter dem Titel „InGe trifft InGenius“ – Entdeckertour Chemie, Physik und Biologie.

Der Kosmonauten-Parcours bot ein kleines Trainingsprogramm für mutige kleine und große Freiburgerinnen und Freiburger mit praktischen physikalischen Versuchen zu Drehstuhl, Kreisel und Rakete. Der Pavillon „Biominalisation – Attraktionen der Natur“ stellte Biominalogie und Biomimetik vor, indem er Besuchern die Untersuchung von Schalen und Skeletten verschiedener Organismen und die Deminalisation von Schneckenhäusern und Muscheln nahebrachte. Der dritte Pavillon „Kristalle und Energie“ lud zum Basteln ein: auf der einen Seite von Kristallstrukturen bzw. platonischen Körpern aus Papier und auf der anderen Seite von Batterien und Solarzellen aus Alltagsgegenständen.

Im „kleinsten Hörsaal der Welt“ – der als Bühne gestaltet war – stellten die Freiburger Physik-Professoren ihre aktuellen Forschungsgebiete in kurzen allgemein verständlichen Vorträgen vor. Den Abschluss gestaltete das Mittelsächsische Theater mit verschiedenen Ausschnitten unter dem Motto „Die Verantwortung des Wissenschaftlers“.

Einige Impressionen der Jubiläumsnacht der Wissenschaft und Wirtschaft sind auf der nächsten Seite zu finden.

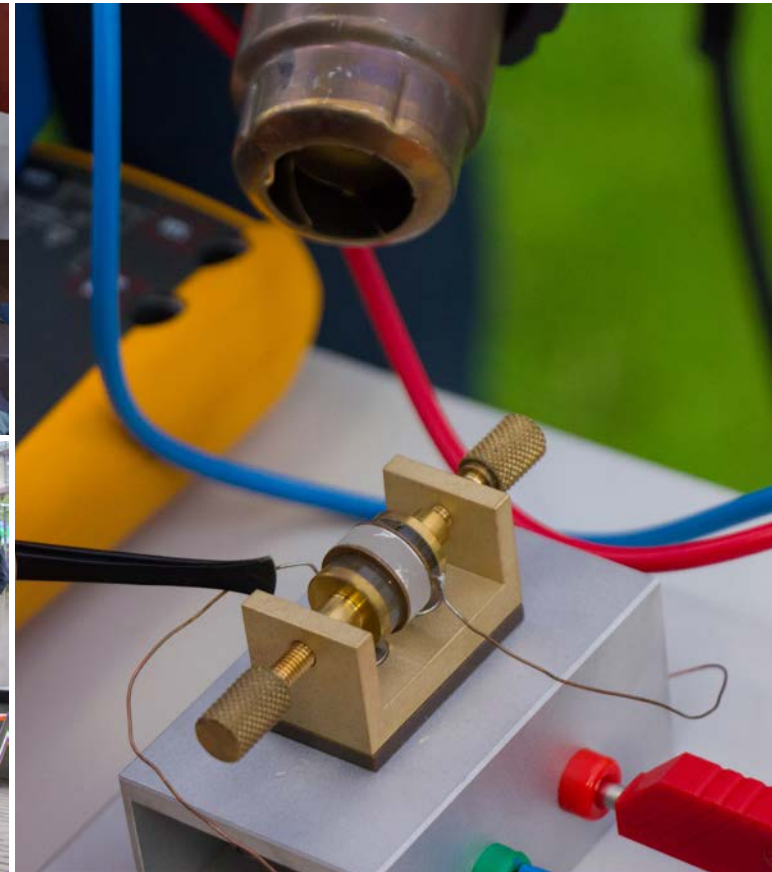
Anlässlich des 500-jährigen Schuljubiläums des Geschwister-Scholl-Gymnasiums Freiberg und des 250-jährigen Universitätsjubiläums fand am 8. Oktober ein Projekttag für die über 1000 Schülerinnen und Schüler des Gymnasiums an der Universität statt. Die Schüler besuchten Vorträge und Vorlesungen in den Lehrgebäuden auf dem Campus oder nahmen an Führungen und Praktika teil.

Am Vormittag wurden im Hörsaal Silbermannstraße von Dr. Hartmut Stöcker und Dirk Prsa Experimente zum Thema „Strom“ im Rahmen einer Experimentalphysik-Vorlesung gezeigt. Die zahlreichen Besucher der Klassenstufen 5 und 6 konnten so die Perspektive einnehmen, die sonst den Studenten vorbehalten ist, und einen kleinen Einblick in die umfangreiche Experimentesammlung gewinnen.

Eine weitere Vorlesung „Röntgenstrahlung und Kristallographie – Forschung mit Nobelpreisgarantie“ wurde am Nachmittag von Dr. Tilmann Leisegang für Schüler der Klassenstufen 10 bis 12 angeboten. Dieser Vortrag war auch Endpunkt des Praktikums „Röntgenstrahlung macht nicht nur Knochen sichtbar“, das den Schülern einen Einblick in die am Institut verwendeten Analysemethoden bot.

Im Seminarraum des Gellertbaus fand der Löt-Workshop „Löte Dein eigenes Blinklicht“ statt, der insbesondere jüngeren Schülern den Umgang mit elektronischen Schaltungen näher brachte. Weiterhin wurden drei Praktikumsversuche des Schülerlabors und das Ganztagespraktikum „Der reinste Raum der Ressourcenuniversität“ angeboten.

Eindrücke vom Projekttag von Geschwister-Scholl-Gymnasium und TU Bergakademie Freiberg sind auf der übernächsten Seite zusammengestellt.





Kennenlernen des Lehr- und Forschungsangebots des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY und des *European XFEL* in Hamburg

Auch im Jahr 2016 wurde die Exkursion des Instituts für Experimentelle Physik zum Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY und *European XFEL* in Hamburg durch die Mittel des Programmes „Dritte Säule des Hochschulpaktes“ im Rahmen des Projektes MESIOR ermöglicht. Diese Projektgelder werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bereitgestellt und bieten die Möglichkeit, aktuelle Forschung an Großgeräten schon innerhalb der akademischen Ausbildung aktiv miterleben und selbst durchzuführen.

So konnten Studierende der Bergakademie wieder die Gelegenheit nutzen, moderne Forschungsmethoden am DESY und XFEL kennenzulernen. Insgesamt 25 Studierende verschiedener Fachrichtungen, haben diese Möglichkeit wahrgenommen (siehe Abb. 1). Vor Ort führten erfahrene Wissenschaftler die Studenten durch alle Bereiche des Forschungszentrums und erläuterten anhand konkreter Experimente die wissenschaftlichen Fragestellungen.

Das Helmholtz-Zentrum DESY ist gegenwärtig vor allem in der Wissenschaft 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 hier Forschern aus vielen Bereichen die derzeit brillanteste Röntgenstrahlung weltweit bereitgestellt.

Das diesjährige 3-Tages-Programm der Freiburger startete mit einer Einführungsvorlesung durch Herrn Dr. Jan Grünert, Gruppenleiter der „X-ray Photon Diagnostics“. In seinem Vortrag erklärte er prinzipi-



Abbildung 1: Freiburger Studenten bei der Führung zum aktuell in der Fertigstellung befindlichen Röntgen-Freie-Elektronen-Laser *European XFEL* während der DESY-Exkursion im März 2016.



Abbildung 2: Verschiedene Ansichten der Beschleuniger und Nachweisinstrumente, die während des Programms gezeigt und vorgeführt wurden: oben Ausschnitte vom HERA-Beschleuniger, unten die neu eingeweihte FLASH II Halle.

elle Funktionsweisen der verschiedenen Beschleuniger und gab Einblicke in die zukünftige Forschung am XFEL. Im Anschluss erfolgte die Besichtigung der Fortschritte der im Bau befindlichen *European XFEL*-Anlage in Schenefeld. Die Inbetriebnahme eines Teils des Linearbeschleunigers soll Anfang 2017 erfolgen. Das Bürogebäude soll bereits Mitte des Jahres 2016 bezogen werden.

Der darauffolgende Tag umfasste neben einer allgemeinen Führung über das DESY-Gelände speziell auch die Demonstration von Experimenten am Linearbeschleuniger FLASH (Dr. Sven Toilekis), an

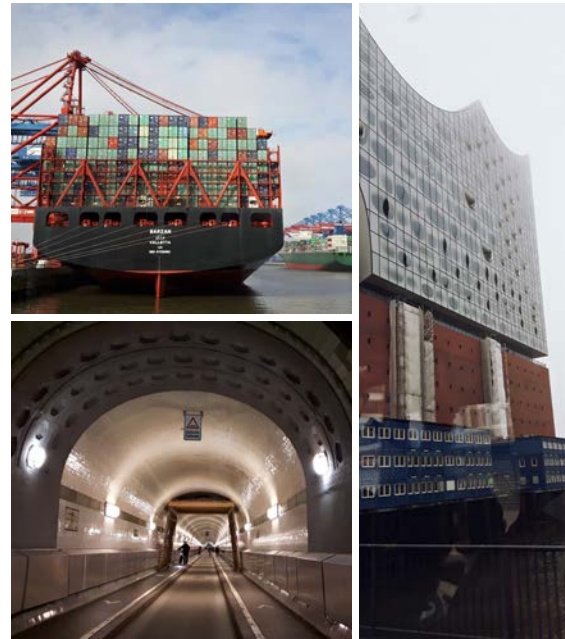


Abbildung 3: Eindrücke der Bus-Hafenrundfahrt: oben links ein Containerterminal, unten links der Alte Elbtunnel und rechts die Elbphilharmonie.

den Speicherringen PETRA III (Dr. Dmitri Novikov) und DORIS III (Dipl.-Phys. Carsten Richter) (siehe Abb. 2).

Abgerundet wurde die Exkursion am Freitag mit einer besonderen Bustour. Die umfangreiche Rundfahrt führt zunächst durch die historische Speicherstadt, die neue HafenCity sowie den Industriehafen. Ein besonderes Erlebnis der Bus-Hafenrundfahrt war die exklusive Besichtigung der Containerterminals, die den Studierenden detaillierte Einblicke hinter die logistischen Kulissen von Deutschlands größtem Seehafen ermöglichte (siehe Abb. 3).

Weihnachtsfeier 2015

Am 15.12.2015 trafen wir uns zu einem gemeinsamen Koch-Abend im „Hof am alten Fernweg“ in Niedboblitzsch.

Unter kompetenter Anleitung in gemütlichem Ambiente bereiteten wir ein tolles Menü zu und ließen es uns anschließend schmecken.



Publikationen und Lehre

Publikationen

Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- T. Weigel, T. Leisegang, M. Zschornak, M. Herrmann, M. Rothenberger, A. Wünsche, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Influence of environmental parameter variations on X-ray beam intensities: a time-dependent absorption correction**, *Journal of Applied Crystallography* 48 (2015) 1870–1882
- C. Cherkouk, L. Rebohle, J. Lenk, A. Keller, X. Ou, M. Laube, C. Neuber, C. Haase-Kohn, W. Skorupa, J. Pietzsch: **Controlled immobilization of His-tagged proteins for protein-ligand interaction experiments using Ni²⁺-NTA layer on glass surfaces**, *Clinical Hemorheology and Microcirculation* 61 (2015) 523–539
- D. M. Itkis, J. J. Velasco-Velez, A. Knop-Gericke, A. Vyalikh, M. V. Avdeev, L. V. Yashina: **Probing Operating Electrochemical Interfaces by Photons and Neutrons**, *ChemElectroChem* 2 (2015) 1427–1445
- A. Vyalikh, P. Simon, E. Rosseeva, J. Buder, U. Scheler, R. Kniep: **An NMR Study of Biomimetic Fluorapatite – Gelatine Mesocrystals**, *Scientific Reports* 5 (2015) 15797
- F. Meutzner, W. Münchgesang, N. A. Kabanova, M. Zschornak, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **On the Way to New Possible Na-Ion Conductors: The Voronoi–Dirichlet Approach, Data Mining and Symmetry Considerations in Ternary Na Oxides**, *Chemistry – A European Journal* 21 (2015) 16601–16608
- A. Benke, E. Mehner, M. Rosenkranz, E. Dmitrieva, T. Leisegang, H. Stöcker, W. Pompe, D. C. Meyer: **Pyroelectrically driven •OH generation by barium titanate and palladium nanoparticles**, *Journal of Physical Chemistry C* 119 (2015) 18278–18286
- V. Garbe, B. Abendroth, H. Stöcker, A. Gavrilov, D. Cohen-Elias, S. Mehari, D. Ritter, D. C. Meyer: **Oxygen and hydrogen profiles and electrical properties of unintentionally doped gallium nitride grown by hydride vapor phase epitaxy**, *Crystal Research & Technology* 50 (2015) 425–431
- F. Hanzig, H. Mähne, J. Veselý, H. Wylezich, S. Slesazeck, A. Leuteritz, M. Zschornak, M. Motylenko, V. Klemm, T. Mikolajick, D. Rafaja: **Effect of the stoichiometry of niobium oxide on the resistive switching of Nb₂O₅ based metal–insulator–metal stacks**, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 202 (2015) 122–127
- F. Hanzig, J. Hanzig, E. Mehner, C. Richter, J. Veselý, H. Stöcker, B. Abendroth, M. Motylenko, V. Klemm, D. Novikov, D. C. Meyer: **Crystallization dynamics and interface stability of strontium titanate thin films on silicon**, *Journal of Applied Crystallography* 48 (2015) 393–400
- S. Rentrop, B. Abendroth, J. Walter, J. Rensberg, W. Münchgesang, R. Strohmeyer, H. Stöcker, C. Ronning, S. Gemming, D. C. Meyer: **Stoichiometry variation for the atomic layer deposition of Sr_xTi_yO_z from Sr(ⁱPr₃Cp)₂, Ti[N(CH₃)₂]₄ and H₂O**, *Thin Solid Films* 577 (2015) 134–142

- J. Hanzig, E. Mehner, S. Jachalke, F. Hanzig, M. Zschornak, C. Richter, T. Leisegang, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Dielectric to pyroelectric phase transition induced by defect migration**, *New Journal of Physics* 17 (2015) 023036

Biomaterialogie und Extreme Biomimetik

- T. Szatkowski, M. Wysokowski, G. Lota, D. Peziak, V. V. Bazhenov, G. Nowaczyk, J. Walter, S. L. Molodtsov, H. Stöcker, C. Himcinschi, I. Petrenko, A. L. Stelling, S. Jurga, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Novel Nanostructured Hematite-Spongine Composite Developed using Extreme Biomimetic Approach**, *RSC Advances* 5 (2015) 79031–79040
- W. Pompe, H. Worch, W. J. E. M. Habraken, P. Simon, R. Kniep, H. Ehrlich, P. Paufler: **Octacalcium phosphate – a metastable mineral phase controls the evolution of scaffold forming proteins**, *Journal of Materials Chemistry B* 3 (2015) 5318–5329
- A. Yu. Petrenko, V. S. Zalkov, V. V. Muzenko, D. N. Tarusin, H. Ehrlich: **Low temperature preservation of mesenchymal stromal cells seeded in various scaffold for tissue equivalent development**, *Journal of Cell Science & Therapy* 6 (2015) 118
- M. Wysokowski, K. Materna, J. Walter, I. Petrenko, A. L. Stelling, V. V. Bazhenov, Ł. Klapiszewski, T. Szatkowski, O. Lewandowska, D. Stawski, S. L. Molodtsov, H. Maciejewski, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Solvothermal synthesis of chitin-polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) nanocomposites with hydrophobic properties**, *International Journal of Biological Macromolecules* 78 (2015) 224–229
- J. Zdarta, Ł. Klapiszewski, M. Wysokowski, M. Norman, A. Kołodziejczak-Radzimska, D. Moszynski, H. Ehrlich, H. Maciejewski, A. L. Stelling, T. Jesionowski: **Chitin-Lignin Material as a Novel Matrix for Enzyme Immobilization**, *Marine Drugs*, Special issue “Marine Polysaccharides” 13 (2015) 2424–2446
- T. Szatkowski, A. Kołodziejczak-Radzimska, J. Zdarta, K. Szwarz-Rzepka, D. Paukszta, M. Wysokowski, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Synthesis and characterization of hydroxyapatite/chitosan composites**, *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 51 (2015) 575–585
- V. V. Bazhenov, M. Wysokowski, I. Petrenko, D. Stawski, P. Sapozhnikov, R. Born, A. L. Stelling, S. Kaiser, T. Jesionowski: **Preparation of monolithic silica-chitin composite under extreme biomimetic conditions**, *International Journal of Biological Macromolecules* 76 (2015) 33–38
- M. Wysokowski, M. Motylenko, J. Beyer, A. Makarova, H. Stöcker, J. Walter, R. Galli, S. Kaiser, D. Vyalykh, V. V. Bazhenov, I. Petrenko, A. L. Stelling, S. Molodtsov, D. Stawski, K. J. Kurzydowski, E. Langer, M. V. Tsurkan, T. Jesionowski, J. Heitmann, D. C. Meyer, H. Ehrlich: **Extreme biomimetic approach for development of novel chitin-GeO₂ nanocomposites with photoluminescent properties**, *Nano Research* 8 (2015) 2288–2301
- M. Wysokowski, I. Petrenko, A. L. Stelling, D. Stawski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Poriferan Chitin as a Versatile Template for Extreme Biomimetics**, *Polymers*, Special issue “Chitin and Chitosans” 7 (2015) 235–265

- M. Wysokowski, I. Petrenko, M. Motylenko, E. Langer, V. V. Bazhenov, R. Galli, A. L. Stelling, Z. Kljajic, T. Szatkowski, V. Z. Kutsova, D. Stawski, T. Jesionowski: **Renewable chitin from marine sponge as a thermostable biological template for hydrothermal synthesis of hematite nanospheres using principles of extreme biomimetics**, *Bioinspired Materials* 1 (2015) 12–22
- A. A. Makarova, E. V. Grachova, V. S. Neudachina, L. V. Yashina, A. Blüher, S. L. Molodtsov, M. Mertig, H. Ehrlich, V. K. Adamchuk, C. Laubschat, D. V. Vyalikh: **Insight into Bio-metal Interface Formation in vacuo: Interplay of S-layer Protein with Copper and Iron**, *Nature Scientific Reports* 5 (2015) 8710
- M. Norman, P. Bartczak, J. Zdarta, W. Tylus, T. Szatkowski, A. L. Stelling, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Adsorption of C. I. Natural Red 4 onto spongin skeleton of marine demosponge**, *Materials*, Special Issue "Advances in Colorants 2014" 8 (2015) 96–116
- H. Ehrlich, A. Witkowski: **Biom mineralization in Diatoms: The Organic Templates**, In: *Evolution of Lightweight Structures* (Ed. Christian Hamm), Series: *Biologically-Inspired Systems*, Vol. 6, Springer Science + Business Media B. V., p. 217

Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

- M. Karolak, M. Izquierdo, S. L. Molodtsov, A. Lichtenstein: **Correlation-Driven Charge and Spin Fluctuations in LaCoO₃**, *Physical Review Letters* 115 (2015) 046401
- V. N. Sivkov, O. V. Petrova, S. V. Nekipelov, A. M. Obiedkov, B. S. Kaverin, A. I. Kirillov, N. M. Semenov, G. A. Domrachev, V. A. Egorov, S. A. Gusev, D. V. Vyalikh, S. L. Molodtsov: **NEXAFS Study of the Composite Materials MWCNTs—Pyrolytic Metals by Synchrotron Radiation**, *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* 23 (2015) 17–19
- R. Steinberger, J. Walter, T. Greunz, J. Duchoslav, M. Arndt, S. L. Molodtsov, D. C. Meyer, D. Stifter: **XPS Study of the Effect of Long-Term Ar⁺ Ion and Ar Cluster Sputtering on the Chemical Degradation of Hydrozincite and Iron Oxide**, *Corrosion Science* 99 (2015) 66–75

Juniorprofessur Kristallphysik

- R. Gumeniuk, M. Schöneich, K. O. Kvashnina, L. Akselrud, A. A. Tsirlin, M. Nicklas, W. Schnelle, O. Janson, Q. Zheng, C. Curfs, U. Burkhardt, U. Schwarz, A. Leithe-Jasper: **Intermetallic germanides with non-centrosymmetric structures derived from the Yb₃Rh₄Sn₁₃ type**, *Dalton Transactions* 44 (2015) 5638–5651
- R. Gumeniuk, W. Schnelle, U. Burkhardt, H. Borrmann, M. Nicklas, A. Ormeci, M. Kohout, L. Akselrud, A. Leithe-Jasper, Yu. Grin: **ThPt₂: A New Representative of Close Packed Tetragonal Structures**, *Inorganic Chemistry* 54 (2015) 6338–6346
- R. Gumeniuk, K. O. Kvashnina, W. Schnelle, A. Leithe-Jasper, Yu. Grin: **Magnetic and transport properties of structural variants of Remeika phases: Th₃Ir₄Ge₁₃ and U₃Ir₄Ge₁₃**, *Physical Review B* 91 (2015) 094110

- Q. Zheng, R. Gumeniuk, H. Rosner, W. Schnelle, Yu. Prots, U. Burkhardt, Yu. Grin, A. Leithe-Jasper: **Synthesis, crystal structure and properties of the new superconductors TaRuB and NbOsB**, Journal of Physics: Condensed Matter 27 (2015) 415701
- J. L. Zhang, G. M. Pang, L. Jiao, M. Nicklas, Y. Chen, Z. F. Weng, M. Smidman, W. Schnelle, A. Leithe-Jasper, A. Maisuradze, C. Beines, R. Khasanov, A. Amato, F. Steglich, R. Gumeniuk, H. Q. Yuan: **Weak interband-coupling superconductivity in the filled skutterudite LaPt₄Ge₁₂**, Physical Review B 92 (2015) 220503(R)

Konferenzbeiträge

Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- F. Meutzner, W. Münchgesang, N. A. Kabanova, M. Zschornak, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Identification of promising new solid electrolytes and electrode materials: The Voronoi-Dirichlet approach for Na-based batteries**, 3. Dresdner Konferenz „Zukunft Energie“ & 4. Workshop „Lithium-Schwefel-Batterien“, Dresden, 10.–11. November 2015, Poster
- T. Nestler, W. Förster, W. Münchgesang, S. Fedotov, C. Cherkouk, S. Braun, F. Meutzner, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Solid Electrolytes for Thin-Film Al-Ion-Batteries?**, 3. Dresdner Konferenz „Zukunft Energie“ & 4. Workshop „Lithium-Schwefel-Batterien“, Dresden, 10.–11. November 2015, Poster
- A. Vyalikh: **Investigation of ionic mobility in NASICON-type solid electrolytes**, Euro-Mediterranean Conference on Materials and Renewable Energies (EMCMRE), Marrakesch, Marokko, 02.–06. November 2015, Poster
- T. Nestler, W. Förster, W. Münchgesang, S. Fedotov, C. Cherkouk, S. Braun, F. Meutzner, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Solid Electrolytes for Thin-Film Al-Ion-Batteries**, EMRS Fall Meeting, Warschau, Polen, 15.–18. September 2015, Poster A.A1.104
- C. Cherkouk, T. Nestler, M. Zschornak, T. Leisegang, D. C. Meyer: **COMSOL Simulation of Flash Lamp Annealed Multilayers for Solid State Electrolyte Fabrication**, COMSOL Conference, Grenoble, Frankreich, 14.–16. Oktober 2015, Poster
- A. Benke, E. Mehner: **•OH-generierende, pyroelektrische Oberflächen für die Desinfektion**, Thementage Grenz- und Oberflächentechnik ThGOT 2015, Zeulenroda, 15.–17. September 2015, Vortrag
- V. A. Vizgalov, A. Sergeev, D. M. Itkis, L. A. Trusov, M. Motylenko, E. Brendler, A. Vyalikh: **NMR evaluation of ionic conductivity for improved performance of glass-ceramic NASICON electrolyte membrane**, 37th Annual Meeting Fachgruppe Magnetische Resonanzspektroskopie, Darmstadt, 07.–10. September 2015, Poster
- T. Köhler, E. Mehner, J. Hanzig, G. Gärtner, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Kinetics of the hydrogen defect in LiNbO_3 and LiTaO_3** , DGK's Young Crystallographers Lab Meeting @ STOE, Darmstadt, 08.–09. September 2015, Poster
- M. Zschornak, J. Hanzig, H. Stöcker, C. Richter, M. Nentwich, E. Mehner, F. Hanzig, S. Jachalke, S. Gorfman, B. Khanbabaee, T. Leisegang, D. Novikov, S. Gemming, D. C. Meyer: **Dynamics of oxygen vacancies in strontium titanate**, 29th European Crystallographic Meeting, Rovinj, Kroatien, 23.–28. August 2015, Vortrag MS16-O3
- C. Richter, E. Mehner, M. Nentwich, J. Hanzig, M. Zschornak, D. V. Novikov, D. C. Meyer: **The use of resonant X-ray diffraction to tune destructive interference as a highly sensitive probe for structural distortions**, 29th European Crystallographic Meeting, Rovinj, Kroatien, 23.–28. August 2015, Vortrag MS46-O4

- E. Mehner, S. Jachalke, J. Hanzig, H. Stöcker, C. Richter, M. Zschornak, D. C. Meyer: **Combining X-ray diffraction and pyroelectric measurements for phase transition investigations**, 29th European Crystallographic Meeting, Rovinj, Kroatien, 23.–28. August 2015, Poster MS15-P12
- B. Khanbabaee, C. Richter, E. Mehner, J. Hanzig, S. Gorfman, D. C. Meyer, U. Pietsch: **Using time-resolved X-ray diffraction to test the piezoelectricity of the field-stabilized polar phase in SrTiO₃**, 29th European Crystallographic Meeting, Rovinj, Kroatien, 23.–28. August 2015, Poster MS15-P28
- M. Coeler, T. Nestler, U. Wunderwald, J. Friedrich, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Synthesis and analysis of λ -MnO₂ spinel for rechargeable aluminium ion solid state battery systems from delithiated LiMn₂O₄**, EMRS Spring Meeting, Lille, Frankreich, 11.–15. Mai 2015, Poster
- A. Vyalikh, V. Vizgalov, A. Sergeev, L. Trusov, E. Brendler, L. Yashina, D. Itkis: **Controllable uniform crystallization towards improved performance in glass-ceramic Li_{1+x}Al_xGe_{2-x}(PO₄)₃ electrolyte membrane**, 249th ACS Spring Meeting, Denver, Colorado, USA, 22.–26. März 2015, Vortrag ENFL 406
- M. Nentwich, M. Zschornak, C. Richter, D. Novikov, D. C. Meyer: **Evaluation of structure proposals of modulated Ho₂PdSi₃ using diffraction anomalous fine structure**, 23. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Göttingen, 16.–19. März 2015, Vortrag MS17-T03
- D. Eger Passos, D. Karsch, H. Stöcker, E. Mehner, U. Bergmann, D. Spitzner, D. C. Meyer: **Characterization of Lithium Niobate Sol-Gel Thin Films with embedded Crystalline Particles**, 23. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Göttingen, 16.–19. März 2015, Poster MSC-P31
- H. Stöcker, B. Störr, S. Jachalke, E. Mehner, J. Hanzig, M. Sonntag, R. Schmid, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Do we know the Pyroelectric Coefficient of Barium Titanate?**, 23. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Göttingen, 16.–19. März 2015, Poster LIG-P08
- F. Meutzner, T. Nestler, W. Münchgesang, N. A. Kabanova, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Identifying new inorganic Na-ion conductors using data-mining and geometric crystallography – the Voronoi-Dirichlet approach**, 23. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Göttingen, 16.–19. März 2015, Poster LIG-P10
- S. Rentrop, B. Abendroth, W. Münchgesang, J. Walter, J. Rensberg, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Modification of resistive switching of TiO₂ by noble gas ion implantation**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 15.–20. März 2015, Poster DS 36.89
- V. Garbe, B. Abendroth, H. Stöcker, A. Gavrilo, D. Cohen-Elias, S. Mehari, D. Ritter, D. C. Meyer: **Oxygen and hydrogen profiles and electrical properties of unintentionally doped n-GaN grown by HVPE**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 15.–20. März 2015, Poster HL 96.7
- T. Köhler, E. Mehner, J. Hanzig, G. Gärtner, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Kinetics of the hydrogen defect in lithium niobate and lithium tantalate**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 15.–20. März 2015, Poster KR 2.5

- T. Weigel, M. Zschornak, M. Herrmann, M. Rothenberger, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Impact of temperature and barometric pressure fluctuations on X-ray beam intensities**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 15.–20. März 2015, Poster KR 2.6
- W. Münchgesang, T. Schucknecht, B. Abendroth, T. Leisegang, D. Rafaja, D. C. Meyer: **Microstructure and electrical characterization of commercial Na- β -Alumina**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 15.–20. März 2015, Poster MM 17.28
- M. Sonntag, M. Ureña de Vivanco, B. Störr, E. Mehner, J. Hanzig, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Heterogeneous Catalysis Driven by Piezoelectric and Pyroelectric Materials**, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 15.–20. März 2015, Poster O 39.6

Biominerologie und Extreme Biomimetik

- A. Petrenko, V. Muzenko, E. Rogulska, V. Zaikov, S. Mazur, D. Tarusin, H. Ehrlich, Y. Petrenko: **Proliferative and differentiation potentials of human adult mesenchymal stromal cells in three-dimensional culture. The effect of storage at cryogenic and ambient temperatures**, International conference „Advances in Cell Biology and Biotechnology“, 11.–13.10.2015, Lviv, Ukraine
- V. V. Mutsenko, O. Yu. Rogulska, D. N. Tarusin, V. Bazhenov, K. Schütz, S. Brueggemeier, E. Gossla, R. Akkineni, A. Lode, M. Gelinsky, A. Yu. Petrenko: **Chitin-based scaffolds from skeletons of marine demosponges *Ianthella basta* and *Aplysina aerophoba*: biocompatibility with human mesenchymal stromal cells**, International conference „Advances in Cell Biology and Biotechnology“, 11.–13.10.2015, Lviv, Ukraine
- H. Ehrlich: **Extreme Biomineralization: from ice to hot springs**, XIIIth International Symposium on Biomineralization (Biomin XIII), 16.–19.09.2015, Granada, Spanien, Keynote Lecture
- A. Ehrlich, J. Matschullat, G. Heide, M. Hengst, E. Niderschlag, H. Meissner, G. Richter, K. Tabachnik, G. Pratesi, R. Galli, M. V. Tsurkan, M. Motylenko, V. V. Bazhenov, J. Walter, S. L. Molodtsov, A. Makarova, D. Vyalikh, M. Wysokowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Discovery of Ca-containing santabarbarite-like biomineral in fossil bivalvia from Miocene**, XIIIth International Symposium on Biomineralization (Biomin XIII), 16.–19.09.2015, Granada, Spanien, Vortrag
- S. Kaiser, M. Wysokowski, M. Motylenko, I. Petrenko, V. V. Bazhenov, A. L. Stelling, H. Ehrlich: **Modern application of Extreme Biomimetics: Novel chitin-GeO₂ nanocomposite with exciting photoluminescent properties**, XIIIth International Symposium on Biomineralization (Biomin XIII), 16.–19.09.2015, Granada, Spanien, Poster
- I. Petrenko, V. V. Bazhenov, M. Wysokowski, R. Galli, A. L. Stelling, E. Niderschlag, H. Stöcker, J. Walter, S. L. Molodtsov, T. Jesionowski, V. Z. Kutsova, H. Ehrlich: **Novel method for metallization of 3D chitinous scaffolds of poriferan origin *in vitro***, XXI Conference of Polish Chitin Society „New Aspects in Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives“, 16.–18.09.2015, Szczecin, Polen, Vortrag

- M. Wysokowski, I. Petrenko, V. V. Bazhenov, S. Kaiser, A. L. Stelling, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Hydrothermal technology as a tool for development of novel chitin-based materials with respect to extreme biomimetic approach**, XXI Conference of Polish Chitin Society „New Aspects in Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives“, 16.–18.09.2015, Szczecin, Polen, Vortrag
- I. Stepniak, M. Galinski, K. Nowacki, M. Wysokowski, V. V. Bazhenov, T. Leisegang, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Zastosowanie kompozytu chitynowo-chitozanowego jako elektrolitu w kondensatorze elektrochemicznym**, XXI Conference of Polish Chitin Society „New Aspects in Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives“, 16.–18.09.2015, Szczecin, Polen, Poster
- H. Ehrlich: **Chitin of poriferan origin: from discovery to application in biomedicine and technology**, 12th International Conference of the European Chitin Society / 13th International Conference on Chitin and Chitosan, 30.08.–02.09.2015, Münster, Plenarvortrag
- M. Wysokowski, I. Petrenko, V. V. Bazhenov, S. Kaiser, A. L. Stelling, D. Stawski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Chitin as novel template for Extreme Biomimetics**, 12th International Conference of the European Chitin Society / 13th International Conference on Chitin and Chitosan, 30.08.–02.09.2015, Münster, Poster (Vortrag im Young Researcher Symposium)
- S. Kaiser, M. Wysokowski, M. Motylenko, I. Petrenko, V. V. Bazhenov, A. L. Stelling, H. Ehrlich: **Hydrothermal synthesis of crystalline germanium oxide on sponge chitin matrices**, 12th International Conference of the European Chitin Society / 13th International Conference on Chitin and Chitosan, 30.08.–02.09.2015, Münster, Poster
- V. V. Bazhenov, I. Petrenko, M. Wysokowski, R. Galli, A. L. Stelling, E. Niederschlag, H. Stöcker, J. Walter, S. L. Molodtsov, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Electrodeposition of Cu/Cu₂O on 3D chitinous scaffolds of poriferan origin**, 12th International Conference of the European Chitin Society / 13th International Conference on Chitin and Chitosan, 30.08.–02.09.2015, Münster, Poster
- M. Wysokowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Hydrothermal Origin of Life as an Inspiration for Extreme Biomimetics**, Goldschmidt 2015, 16.–21.08.2015, Prag, Tschechische Republik
- M. Wysokowski, K. Materna, I. Petrenko, L. Klapiszewski, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Solvothermal synthesis of hydrophobic chitin-POSS nanocomposite**, European Polymer Federation Congress 2015, 21.–26.07.2015, Dresden, Poster
- T. Jesionowski, M. Wysokowski, O. Lewandowska, K. Materna, H. Ehrlich: **Synthesis of advanced chitin-POSS materials prepared via solvothermal method**, Eurofillers Polymer Blends 2015, 26.–30.06.2015, Montpellier, Frankreich, Vortrag

Graduierungen und studentische Arbeiten

Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- Lukas Hell: **Atomlagenabscheidung ternärer Oxide**, Forschungsbezogenes Projektseminar, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Tina Weigel: **Impact of temperature and barometric pressure fluctuations on X-ray beam intensities – A time-dependent absorption correction**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Juliane Erdmann: **Von der Einkristallbatterie zur Strontiumtitanat-Pulverbatterie – Proof of Concept mittels Impedanzspektroskopie**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Rocco Liebschner: **Röntgenographische Charakterisierung der Platin-Schicht eines über Sputter-deposition hergestellten Pt/TiO_x/SiO₂/Si-Systems für die Eignung als Bodenelektrode für auf Relaxoren basierenden ferroelektrischen Dünnschichten**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Mandy Koitzsch: **Fabrication and Characterization of Pyroelectric Lithiumniobate/Polyamide 11 Surface Composites**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- David Renz: **Entwicklung eines Messsystems zur Charakterisierung der elektrochemischen Wechselwirkung pyroelektrischer Oberflächen mit wässrigen Medien unter thermischer Anregung**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Alexander Kühne: **Strukturelle und elektrochemische Bewertung von einkristallinem Graphit als Interkalationswirt für Eisenionen**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Dan Richter: **Design eines Heizersystems zur Messung pyroelektrischer Koeffizienten**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Thomas Köhler: **Kinetik des Wasserstoffdefektes in Lithiumniobat und Lithiumtantalat**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Valentin Garbe: **Ohmic Ti/Al/TiN Contacts to n-GaN Fabricated by Sputter Deposition**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Matthias Zschornak: **Defect-induced Local Electronic Structure Modifications within the System SrO–SrTiO₃–TiO₂ – Symmetry and Disorder**, Doktorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015

Biomineralogie und Extreme Biomimetik

- Toni Köppe: **Entwicklung von neuen Methoden zur Extraktion von Bromtyrosinen aus marinen Schwämmen der Ordnung Verongida**, Diplomarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015

- Izabela Zglobicka: **Exploratory study of the use of *Didymosphenia geminata* stalks as a functional biomaterial**, Doktorarbeit, TU Warschau, 2015.

Photovoltaik

- Bernd Weber: **Untersuchung der Material begrenzenden Einflüsse beim Multidrahtsägen von Silicium unter Verwendung gerader und strukturierter Drähte**, Doktorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015
- Katja Krockert: **Development and characterization of a low thermal budget process for multi-crystalline silicon solar cells**, Doktorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, 2015

Angebotene Lehrmodule

- **Biomineralogy (Englisch)**, Prof. Dr. habil. Hermann Ehrlich, Sommersemester, 3 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum.
- **Energiewandlung und Speicherung**, zur Hälfte durch Dr. Holger Neuhaus, Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Halbleitermaterialien**, Dr. Barbara Abendroth und Dr. Matthias Zschornak, Wintersemester und Sommersemester, 2 × 2 SWS Vorlesung, 2 × 1 SWS Übung, 2 × 1 SWS Praktikum.
- **Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern**, Prof. Dr. Serguei Molodtsov, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung als Blockveranstaltung am DESY in Hamburg.
- **Material Properties – Semiconductors (Englisch)**, Dr. Hartmut Stöcker, Wintersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Photovoltaik-Solarmodule – Materialien und Technologie**, Prof. Dr. Ingo Schwirtlich, Wintersemester und Sommersemester, 2 × 2 SWS Vorlesung.
- **Physik der Halbleiter**, Prof. Dr. 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**, Dr. Tilmann Leisegang, Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Physik für Naturwissenschaftler II**, Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 4 SWS Praktikum.
- **Physik und Charakterisierung von Industriesolarzellen**, Dr. Holger Neuhaus, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Physik und Chemie stark korrelierter Materie**, Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk, Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum
- **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.

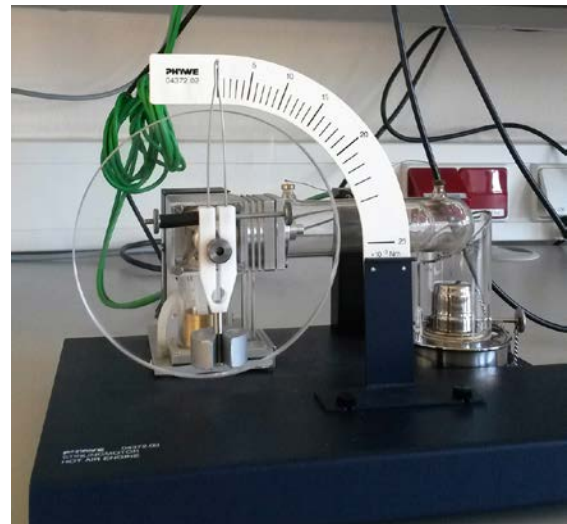
- **Struktur der Materie II: Elektronische Eigenschaften**, Dr. Claudia Funke,
Sommersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit kristallinen Materialien**, Dr. Tilmann Leisegang,
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung, 2 SWS Praktikum.

Physikalisches Grundpraktikum

Das vom Institut für Experimentelle Physik organisierte Praktikum zu den Vorlesungen „Physik für Naturwissenschaftler“ und „Physik für Ingenieure“ absolvieren ca. 600 Studierende pro Jahr. Für neun naturwissenschaftliche Studiengänge (z. B. Angewandte Naturwissenschaft, Chemie, Geologie/Mineralogie) werden jeweils 12 Termine während des ersten Sommersemesters und für 17 ingenieurwissenschaftliche Studiengänge (z. B. Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Verfahrenstechnik) werden jeweils sieben 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 Instituts 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-Gymnasien 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
Direktor des Instituts 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

Blick auf den beheizten Probenhalter bei einer Temperatur von ca. 1000 °C in der UHV-Kammer für pyroelektrische Messungen © Sven Jachalke.

Autoren

- 5 Hartmut Stöcker
 15–19 Dirk C. Meyer, Hartmut Stöcker,
 Tilmann Leisegang
 21–25 Hermann Ehrlich, Sabine Kaiser
 26–34 Serguei Molodtsov, Friedrich Roth
 35–37 Roman Gumeniuk, Barbara Abendroth,
 Walter Schnelle, Matej Bobnar,
 Igor Veremchuk, Andreas Leithe-Jasper
 38–39 Ingo A. Schwirlich
 40–44 Barbara Abendroth
 46–48 Tilmann Leisegang
 51–57 Tilmann Leisegang, Falk Meutzer,
 Tina Nestler, Juliane Hanzig,
 Charaf Cherkouk, Thomas Köhler
 58–59 Anastasia Vyalikh, Wolfram Münchgesang
 60–61 Tilmann Leisegang, Barbara Abendroth,
 Wolfram Münchgesang
 62–63 Carsten Richter
 64–67 Tilmann Leisegang, Hartmut Stöcker,
 Erik Mehner, Sven Jachalke,
 Mateo Ureña de Vivanco
 68–70 Tilmann Leisegang, Marco Herrmann
 71–72 Tilmann Leisegang, Hendrik Naumann,
 Marco Herrmann, Thomas Naumann,
 Karsten Püschner
 73 Hartmut Stöcker
 74–75 Barbara Abendroth
 76–79 Theresa Lemser
 81 Alena Raatz
 83 Hartmut Stöcker
 86–87 Alena Raatz, Falk Meutzner
 88 Hartmut Stöcker
 103 Hartmut Bergelt

Bildquellen

- 1 Medienzentrum
 5–12 Sven Jachalke
 13 Claudia Funke, Thomas Behm
 20 Robert Schmid, Sven Jachalke
 21–24 Vasilii Bazhenov, Sabine Kaiser
 25 BromMarin GmbH
 26–33 European XFEL GmbH
 35–36 Roman Gumeniuk
 38 Thomas Kaden
 40–45 Barbara Abendroth, Sven Jachalke,
 Thomas Behm, Solveig Rentrop,
 Valentin Garbe
 46 Tina Weigel, Claudia Funke, Thomas Behm
 47 Tina Weigel, Sven Jachalke
 48 Falk Meutzner
 51 Vasilii V. Bazhenov, Wolfram Münchgesang
 52 Tina Nestler, Falk Meutzner, Juliane Hanzig,
 Thomas Köhler
 54 Falk Meutzner, Wolfram Münchgesang
 55 Sven Jachalke, Tina Nestler
 56 Tina Nestler, Falk Meutzner
 58–59 Anastasia Vyalikh, Wolfram Münchgesang
 60–61 Falk Meutzner, Tina Nestler, Sven Jachalke
 62–63 Carsten Richter
 64 Tilmann Leisegang
 65 Annegret Benke
 66 Erik Mehner, Sven Jachalke
 67 Semën Gorfman, Bianca Störr
 68–70 Marco Herrmann, Bernhard Jung
 71–72 Hendrik Naumann, Tilmann Leisegang
 73 Claudia Funke, Thomas Behm,
 Ralph Strohmeyer
 74–75 Barbara Abendroth, Uta Fischer,
 Solveig Rentrop
 76–78 Theresa Lemser
 81–85 Sven Jachalke
 86–87 Alena Raatz
 88 Erik Mehner
 103 Hartmut Bergelt

