

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

für den vorliegenden Jahresbericht 2016 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. Auch im Jahr 2016 wurden wieder zahlreiche Abschlüsse in verschiedenen Stufen der fachlich-wissenschaftlichen Qualifikation erreicht. Den erfolgreichen Weg dahin ebneten ganz maßgeblich die Betreuungsleistungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Für ihr außerordentliches Engagement in allen Bereichen der Lehre und Selbstverwaltung bin ich zusätzlich dankbar.

Auch dieses Jahr war durch die aktive Teilnahme an internationalen Fachkonferenzen und weiteren einschlägigen Veranstaltungen gekennzeichnet. Mit besonderer Freude und Stolz denke ich dabei an erzielte Anerkennungen durch Stipendien, Preise und andere Ehrungen in diesem Zusammenhang. Neben zahlreichen Publikationen in internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften blicken wir auch auf Zusammenfassungen unserer Forschungsarbeiten in verschiedenen Formaten zurück. Damit haben wir zusätzlich zur Vermittlung von Themenschwerpunkten unseres Instituts zur externen Wahrnehmung der Innovationskraft der Bergakademie beigetragen. Die Ergebnisse unserer kreativen und intensiven Arbeit waren die Grundlage für die Einwerbung unterschiedlicher Anschlussvorhaben, die uns den Erhalt und weiteren Ausbau unserer entwickelten Kompetenzen ermöglichen. Dies betrifft zuerst Themen der Energiewandlung und -speicherung sowie zu Funktionsmaterialien für unterschiedlichste Anwendungen. Dabei gehe ich in Gedanken an den Beginn des vor sechs Jahren aufgenommenen gemeinsamen Weges zurück. Für unsere Zielsetzung, durch kristallphysikalische und verwandte Methoden Materialeigenschaften durch



gezielte strukturelle Modifizierungen hervorzubringen, existieren inzwischen zahlreich eindrucksvolle Belege. Die nunmehr gewährleistete Fortsetzung unseres langjährigen Engagements an internationalen Großforschungseinrichtungen erforderte besondere Anstrengungen. Entsprechend froh und dankbar bin ich für die Möglichkeit der weiteren Ausarbeitung unserer methodischen Ansätze am Deutschen Elektronensynchrotron DESY. Unsere Arbeitsschwerpunkte liegen zugleich im Fokus der Forschungsprogrammatik des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung ZeHS, womit dessen fachliche Ausgestaltung zugleich maßgeblich gestützt wird. Für die Phase des Baus, dessen planerische Vorbereitung sehr weit gediehen ist, bildet das IEP zugleich die organisatorische Heimstatt, womit wir unsere Infrastruktur für eine universitätsweite Initiative zur Verfügung stellen.

Unser Institut verfügt über etablierte Partnerschaften und wertvolle persönliche Verbundenheit. So hat uns Herr Professor Peter Paufler, auf dessen wissenschaftlicher Schule wir aufbauen, weitere Fachbuchbestände für unsere tägliche Arbeit übergeben.

Ich freue mich auf die weitere Zusammenarbeit im Jahr 2017 und auf Gelegenheiten, gemeinsam spannende wissenschaftliche Fragestellungen ins Auge zu fassen.

Mit besten Grüßen und Glückauf

Direktor des IEP und des ZeHS



## Inhalt

<b>Das Institut für Experimentelle Physik</b>	<b>4</b>
Das Institut	5
Die Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik	6
Geräte am Institut für Experimentelle Physik	8
Bearbeitete Stoffsysteme	10
Wandertag 2016	12
<b>Arbeitsgruppen</b>	<b>14</b>
Arbeitsgruppe Prof. Dirk C. Meyer „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“	15
Arbeitsgruppe Prof. Hermann Ehrlich „Biominingologie und Extreme Biomimetik“	21
Arbeitsgruppe Prof. S. Molodtsov „Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“	25
Arbeitsgruppe Jun.-Prof. Roman Gumeniuk „Kristallphysik“	34
Methodisches Kompetenzzentrum Elektronikmaterialien	36
Methodisches Kompetenzzentrum Energiematerialien	38
<b>Projekte</b>	<b>44</b>
BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept	45
BMBF-Verbundprojekt R2RBattery	49
BMBF-Verbundprojekt SyNeSteSia	52
BMWi-Verbundprojekt BaSta	54
Freiberger Zentrum für Pyroelektrizität	57
Nutzung von Abwärme zur Erzeugung von Wasserstoff und Elektrizität	60
Pyro- und dielektrische Eigenschaften von Hochtemperaturpiezoelektrika	62
ESF-Nachwuchsforscherguppe HALMA	64
REXSuppress – Resonante Röntgendiffraktion unter optimierter destruktiver Interferenz	66
Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung	68
Stipendien	73
<b>Lehre</b>	<b>74</b>
ESF-Finanzierung zur Verbesserung der Physiklehre	75
HERCULES-European School – 5 Wochen mit Röntgenstrahlen und Neutronen	76
Kennenlernen des Lehr- und Forschungsangebots des DESY und des <i>European XFEL</i>	78
Junge Kristallographen	80
Physikalisches Grundpraktikum	81
Angebotene Lehrmodule	82
<b>Publikationen</b>	<b>84</b>
Wissenschaftliche Publikationen	85
Konferenzbeiträge	90
Graduierungen und studentische Arbeiten	96
Impressum	98

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



**Ein Teil der Mitarbeiter des IEP (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 Reißeweber, 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 Schmidt  
Tel.: 03731 39 2892  
Fax: 03731 39 4314  
schmidt.stefanie@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

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

#### Elektronische Werkstatt

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

#### 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  
gaertner@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 bis 30 kV Spannung
- 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*
- Hochgeschwindigkeitskamera pco 1200
- Jeol JSM 6400, Rasterelektronenmikroskop
- Keyence, Fluoreszenzmikroskop
- Leitz Ergolux AMC, Lichtmikroskop
- PIV-System, *Particle Image Velocimetry*
- SIRM, *Scanning Infrared Microscopy*
- Thermographiesystem VarioCAM basic
- 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 mit Tieftemperaturzusatz
- 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
- Specord S600, UV/Vis-Spektrometer
- Spektroskopie-Messplatz mit InGaAs-Kamera
- Thermo Fisher Escalab 250Xi, Röntgenphotoelektronenspektrometer

### Temperaturbehandlung

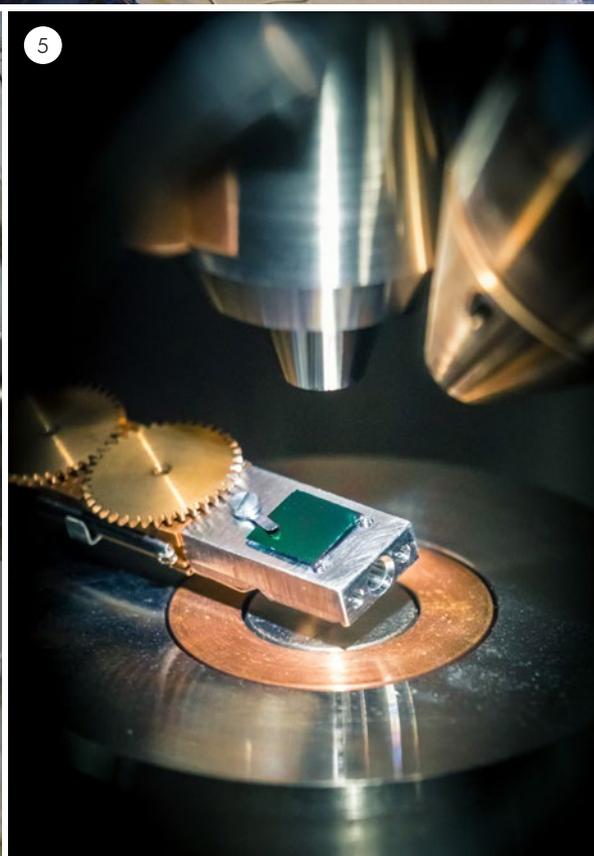
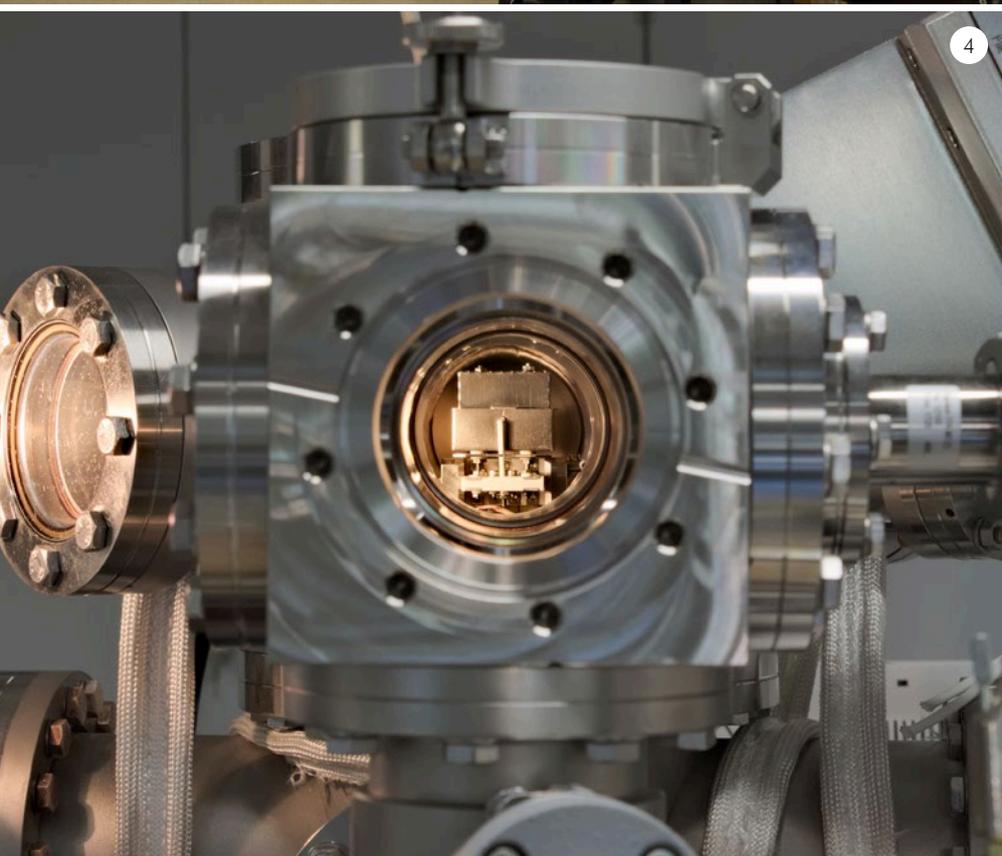
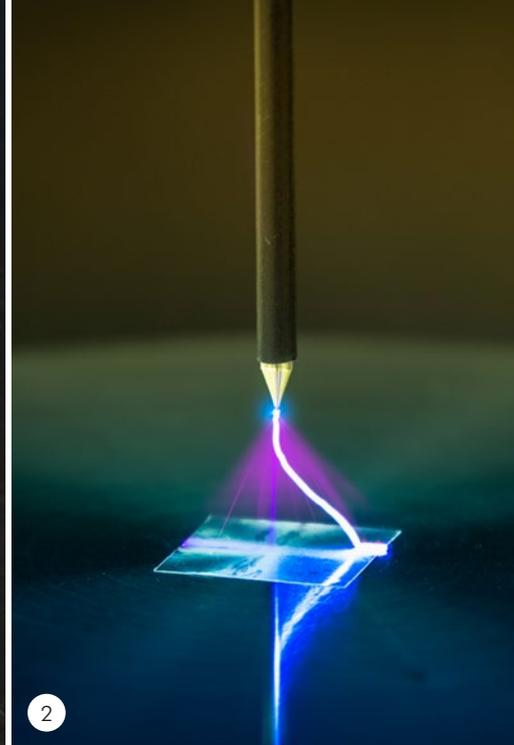
- Carbolite, Rohrofen bis 1200 °C
- Gero, Zehnzonenofen bis 1200 °C
- Heraeus, Rohrofen bis 1100 °C
- Leco FRH-80/200/1300, Rohrofen bis 1300 °C
- Xerion RO, Rohrofen bis 1100 °C
- Xerion Xtube, Dreizonenofen bis 1200 °C

### Topographie

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

### Bilder auf der nächsten Seite:

- 1 *In-situ*-Kammer für pyroelektrische Messungen
- 2 Korona- und Blitzentladung über einer Polymerprobe
- 3 Blick ins Labor für pyroelektrische Materialien
- 4 UHV-Kammer für pyroelektrische Messungen
- 5 Probenhalter im Thermo Fisher Escalab 250Xi



## Bearbeitete Stoffsysteme

### Verbindungshalbleiter

- oxidische Halbleiter (z. B.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ) 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.  $\text{HoPdSi}_2$
- oxidische Pyroelektrika, z. B.  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$  und  $\text{LiTaO}_3$
- pyroelektrische Polymere, z. B. PVDF
- Galliumnitrid (GaN)

### Batteriematerialien

- Kathodenmaterialien: Al-, Na-basierte Systeme
- Festelektrolyte:  $\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3$ , Na- und Al-Ionenleiter, Na-Y-Si-O-System
- Anodenmaterialien: Al und Na-Sb-Sn-System

### Biomaterialien

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

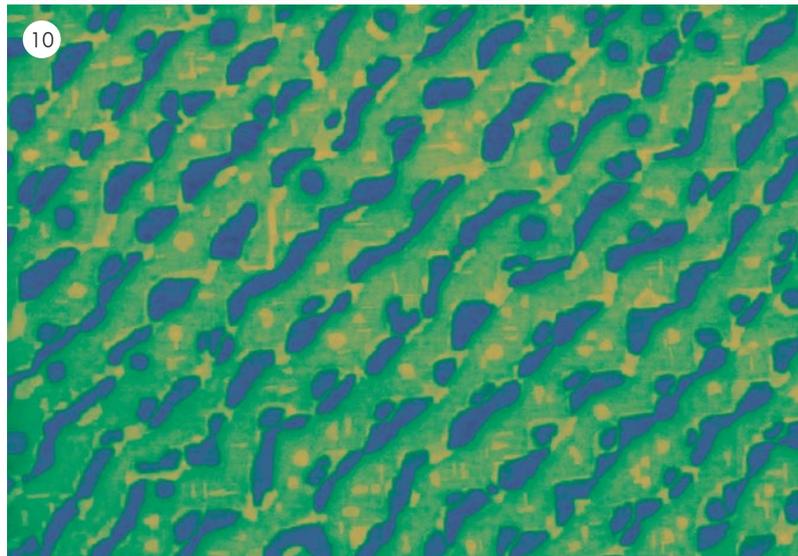
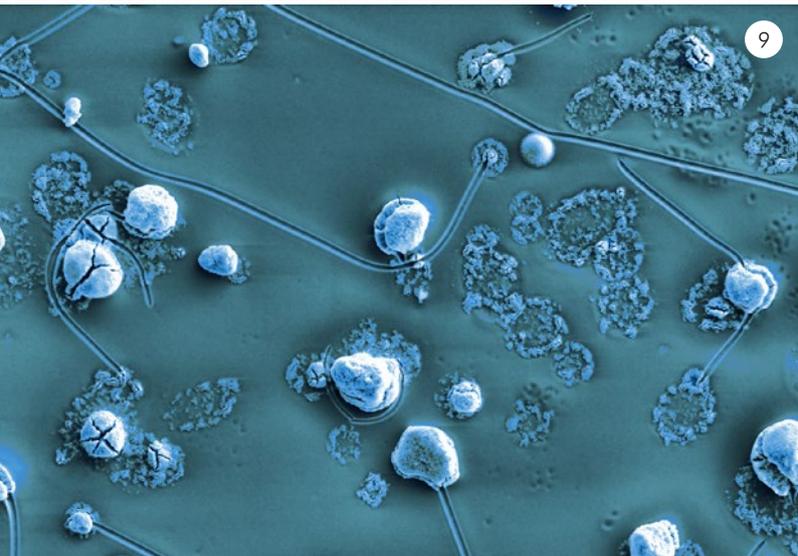
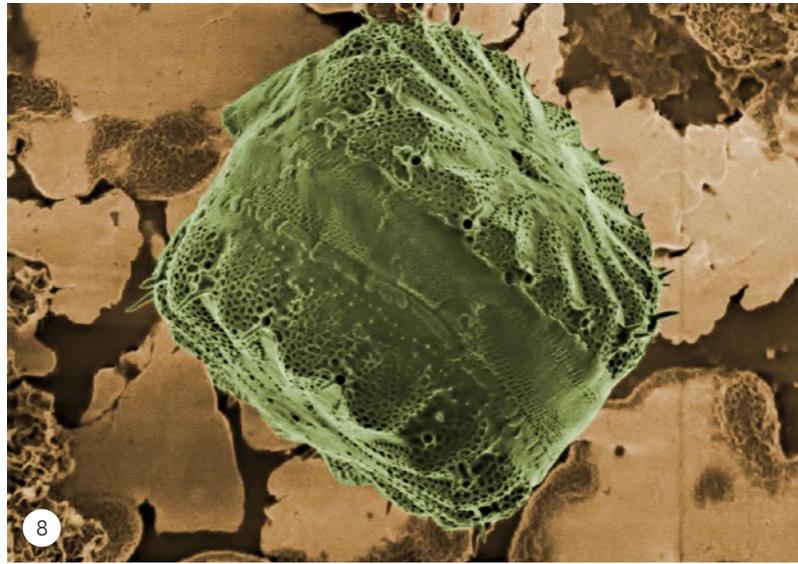
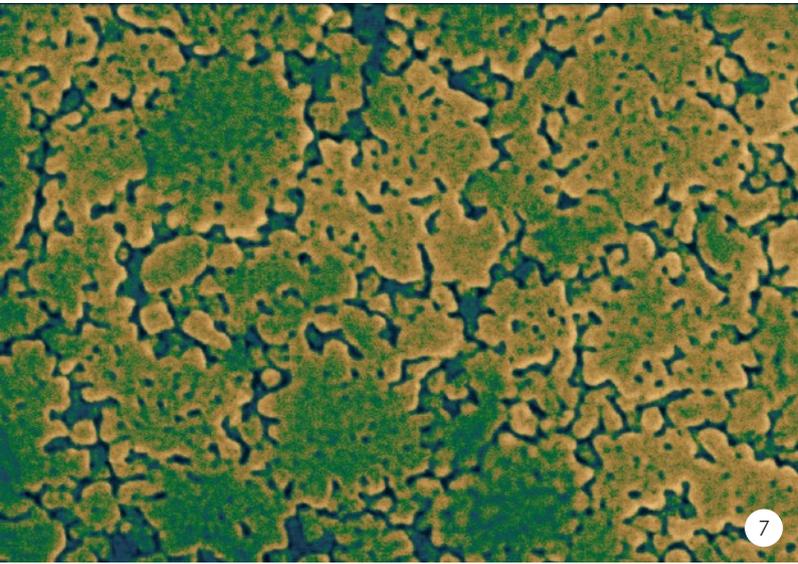
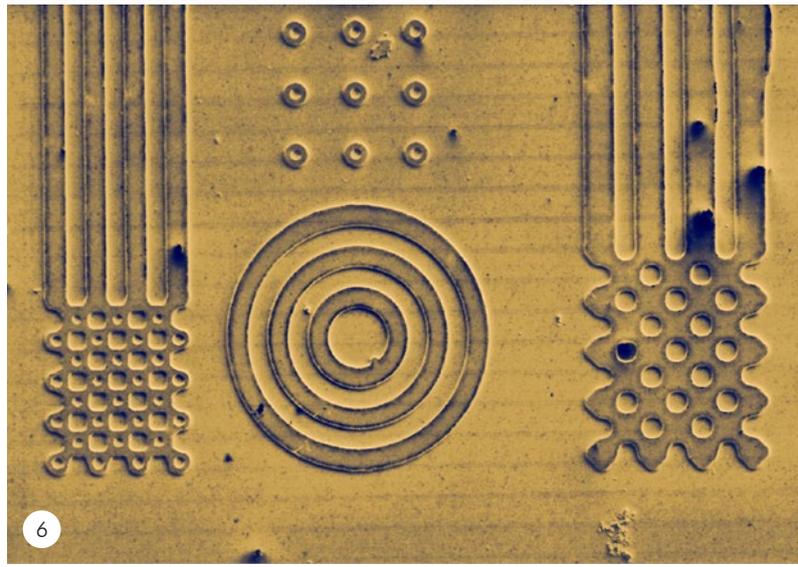
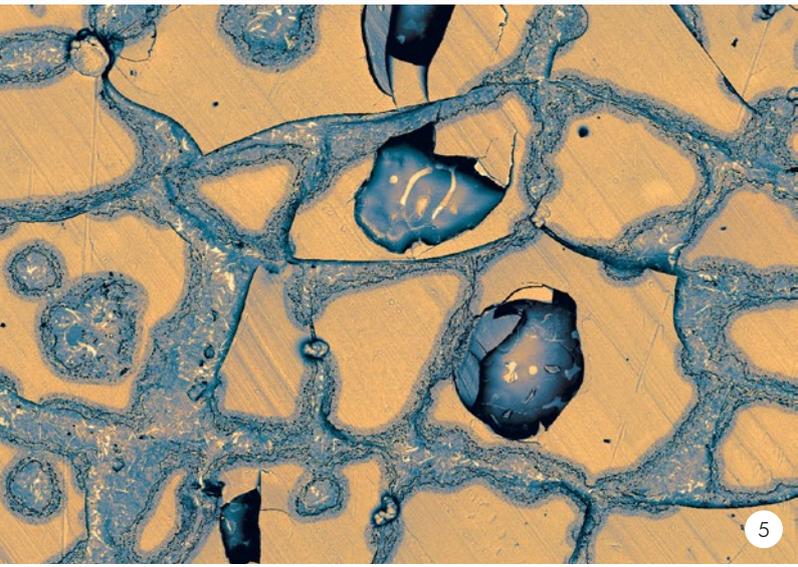
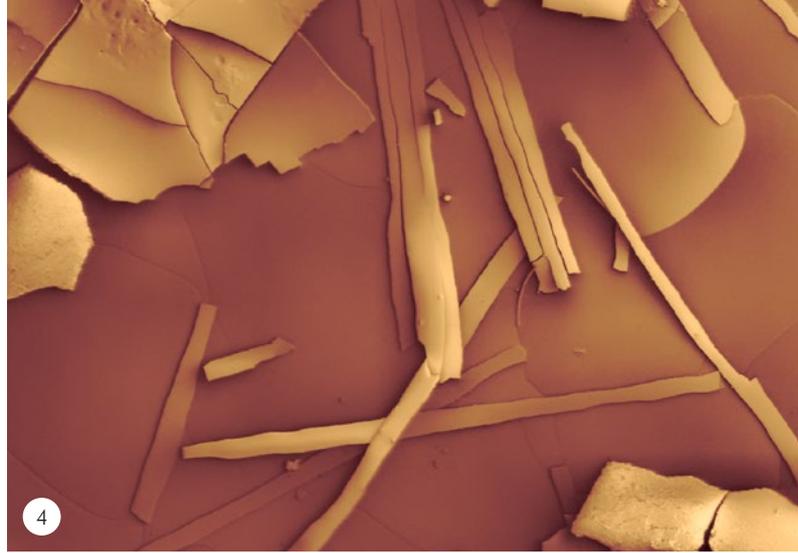
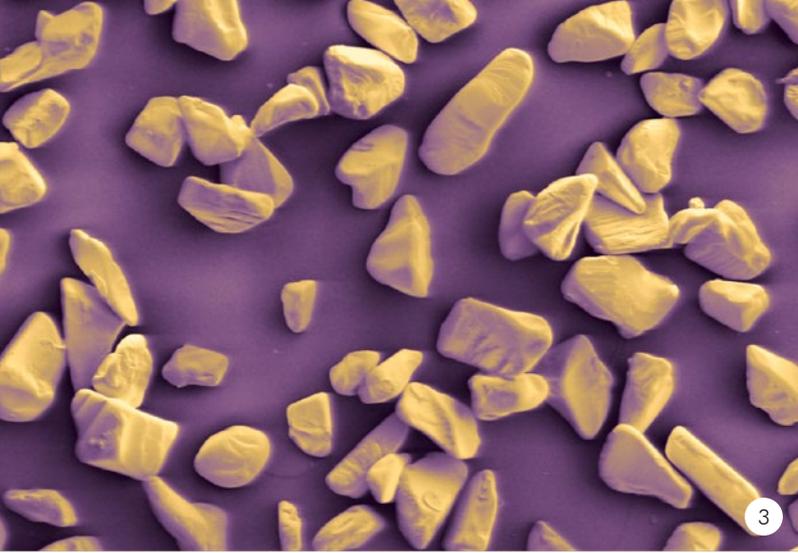
### Kristallphysik

- ferromagnetische Legierungen
- Graphen und Graphenoxid
- intermetallische Phasen aus Übergangsmetallen und Seltenerdmetallen
- metallische binäre und ternäre Chalkogenide der Übergangsmetalle
- Molekülkristalle, Mott-Isolatoren
- Remeika-Phasen
- supraleitende Sulphide

### Bilder auf den nächsten Seiten:

- 1 Halterung zur Beschichtung von Kristallstücken
- 2 Batterie-Knopfzellen
- 3 Gemahlenes  $\text{LiNbO}_3$  mit  $90 \mu\text{m}$  mittlerer Partikelgröße
- 4 Abgeplatzte Beschichtung
- 5 Metallinduzierte Kristallisation von Silizium auf Al-Substrat
- 6 GaN-Teststruktur auf Si-Wafer
- 7 Getemperte  $\text{SrTiO}_3$ -Beschichtung
- 8 Kieselalge *Cyclotella meneghiana*
- 9  $\text{BaTiO}_3$ -Beschichtung mit  $\text{BaTiO}_3$ -Partikeln
- 10  $\text{SrTiO}_3$ -Einkristalloberfläche





## Wandertag 2016

Am 29.09.2016 trafen sich die Mitarbeiter des Instituts zu einer gemeinsamen Wanderung von Mulda nach Blockhausen bei Dorfchemnitz.

Bei schönstem Wetter betrachteten die Teilnehmer die Sägeketten-Schnitzereien und ließen sich die Bratwürste schmecken.





# 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 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. 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 auftretenden Kopplungsphänomene besonders gewürdigt werden. Durch Einwerbung von Drittmitteln wurde die Infrastruktur der Arbeitsgruppe und des Instituts insbesondere im Hinblick auf die Synthe-

se und Charakterisierung dünner Schichten stark ausgebaut. Als neue Methoden konnten die ALD und die Plasmaätzung im Zentralen Reinraumlabor etabliert werden. Im Rahmen eines Großgeräteantrages wurden die Charakterisierungsmöglichkeiten 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, seit 2016 auch Direktor des im Aufbau befindlichen Zentrums für effiziente Hochtemperaturstoffwandlung (ZeHS). Prof. Dirk C. Meyer ist u. a. Leiter des BMBF-Verbundprojekts „CryPhysConcept“ und „R2RBattery“. 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 Abwärme 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.



Ein Teil der ca. 25 Mitarbeiter umfassenden Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ sowie weitere Angehörige des IEP (von links oben nach rechts unten): Patrick Zill, Tatjana Suworow, Uta Fischer, Sabine Kaiser (Arbeitsgruppe Prof. Ehrlich), Dr. Hartmut Stöcker, Dr. Anastasia Vyalikh, Dirk Prsa, Melanie Nentwich, Dr. Juliane Hanzig, Sven Jachalke, Christoph Irmer, Manuel Feig (Arbeitsgruppe Prof. Gumenuik), Dr. Barbara Abendroth, Dr. Claudia Funke, Thomas Köhler, Florian Alt, Valentin Garbe, Dr. Hartmut Bergelt, Christian Radach, Sandra Jankus, Theresa Lemser, Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Erik Mehner.

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. Er wird für alle Arten pyroelektrischer Materialien eingesetzt: Oxidmaterialien und Polymere in Form von Kristallen, Pulvern oder Schichten.

### 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. Das Projekt wird gemeinschaftlich von Bergakademie, Fraunhofer THM Freiberg, Fraunhofer IWS Dresden und Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg bearbeitet.

Forschungsschwerpunkte des dreijährigen BMWi-Verbundprojekts „BaSta – Batterie: Stationär in Sachsen“, welches vom Fraunhofer IWS Dresden koordiniert wird, sind Materialien für die Niedertemperatur-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. Durch sein großes spezifisches Speichervermögen, seine hohe Sicherheit und Lebensdauer sowie vertretbare Kosten soll dieser Batterietyp die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende in Deutschland verbessern helfen.

Ziel des im September 2016 gestarteten BMBF-Verbundprojekts „R2RBattery“ ist es, ein Post-Lithium-Energiespeichersystem auf Basis hochvalenter Ionen in Kooperation mit lokalen Industrie- und Forschungspartnern zu entwickeln und maßgeschneiderte Lösungen für deren potentielle großtechnische Produktion zu erarbeiten. Innerhalb der nächsten drei Jahre werden insgesamt vier Verbundpartner (Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg, Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden, Vowalon GmbH Treuen) unter Leitung der TU Bergakademie Freiberg (Koordinator: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Projektmanager: Dr. Tilmann Leisegang) an der Umsetzung dieser neuen Post-Lithium-Ansätze für die elektrochemische Energiespeicherung arbeiten.

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 von metastabilen und reaktiven Phasen ermöglichen. Diese Zellen werden dann unter anderem für die Charakterisierung mittels Nuklear-Magnetresonanz-(NMR)-Spektroskopie, für die Röntgenanalytik und an beschleunigerbasierten Photonenquellen so-

wie 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 intensiv 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.

### 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 Synchrotron 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 atomlagensensitiven Variante der Röntgenspektroskopie

wird in der Arbeitsgruppe insbesondere für die Charakterisierung struktureller Defekte vorangetrieben. Die im Rahmen eines BMBF-Verbundvorhabens am Synchrotron Petra III des DESY in Hamburg einggerichtete *Chemical Crystallography Beamline* wird 2017 in Betrieb gehen.

## 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 Halbleiternaterialien 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. Neben dem Erfahrungsaustausch mit weiteren Forschungsinstitutionen stehen auch aktuelle Probleme und Bedarfe regionaler und überregionaler Unternehmen im Zentrum der Diskussionen.

Die Aktivitäten am GIZeF konzentrieren sich auf die Untersuchung von Energie- und Stoffwandlungsphänomenen, die Systematisierung bestehenden Wissens mithilfe eines Wissenschaftsmanagement-



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

systems, die Ableitung neuer Konzepte und schließlich die Ausarbeitung von Strategien für deren Realisierung. Dazu werden mittel- bis langfristig angelegte nationale und internationale 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 dritten Mal 2017 stattfinden wird und den Ausbau der nationalen und internationalen Vernetzung unterstützt. Herauszuheben sind die intensiven, nunmehr langjährigen Kooperationen

mit dem *Samara Center for Theoretical Materials Science* (Direktor Prof. Vladislav A. Blatov) der *Samara National Research University* (Russland) und der Arbeitsgruppe Prof. Doron Aurbach der *Bar-Ilan University*, Ramat Gan (Israel).

Insgesamt sind in der Außenstelle Arbeitsplätze für 20 Mitarbeiter und ein Beratungsraum 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.

## Arbeitsgruppe Prof. Hermann Ehrlich „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“

Die Arbeitsgruppe „Biomaterialogie und Extreme Biomimetik“ forscht seit 2012 an Themenkomplexen zu Biomaterialisations-, Dematerialisations- und Rematerialisationsprozessen von Organismen unter extremen Lebensbedingungen (erhöhter Salzgehalt, eisige Temperaturen, große Drücke, hohe Elementkonzentrationen) sowie zu biomimetischen Fragestellungen. Letztere umfassen biomimetische *In-vitro*- und *In-vivo*-Methoden zur Synthetisierung von Biokompositen und Nanostrukturen einschließlich deren Charakterisierung. Leiter der Arbeitsgruppe ist Prof. Hermann Ehrlich. Im Jahr 2016 setzten Vasilii Bazhenov, Sabine Kaiser, Iaroslav Petrenko sowie assoziierte Studenten und Doktoranden der TU Freiberg, der TU Posen und der TU Warschau die Arbeiten an den Grundlagen dieses wissenschaftlichen Neulandes fort.

### Veröffentlichungen

Neben der Arbeit an Qualifikationsschriften entstanden mehrere Beiträge auf Symposien und Tagungen (siehe Abbildung 1). Weiterhin wurden zwölf Veröffentlichungen publiziert. Die Artikel erschienen in *Advanced Functional Materials*, *RSC Advances*, *International Journal of Molecular Sciences*, *International Journal of Biological Macromolecules* und *Advanced Optical Materials*. Zudem erschienen zwei Aufsatzsammlungen, in welchen aktuelle Forschungsergebnisse der Fachwelt zugänglich gemacht werden (siehe Abbildung 2).

### Buchvorstellungen

Schwerpunkt der 381 Seiten starken, im Springer-Verlag erschienen, Monographie „Marine Sponges: Chemicobiological and Biomedical Applications“ (Herausgeber R. Palela & H. Ehrlich) sind marine Schwämme, die biophysikalischen und chemischen Eigenschaften von Schwammmetaboliten und de-

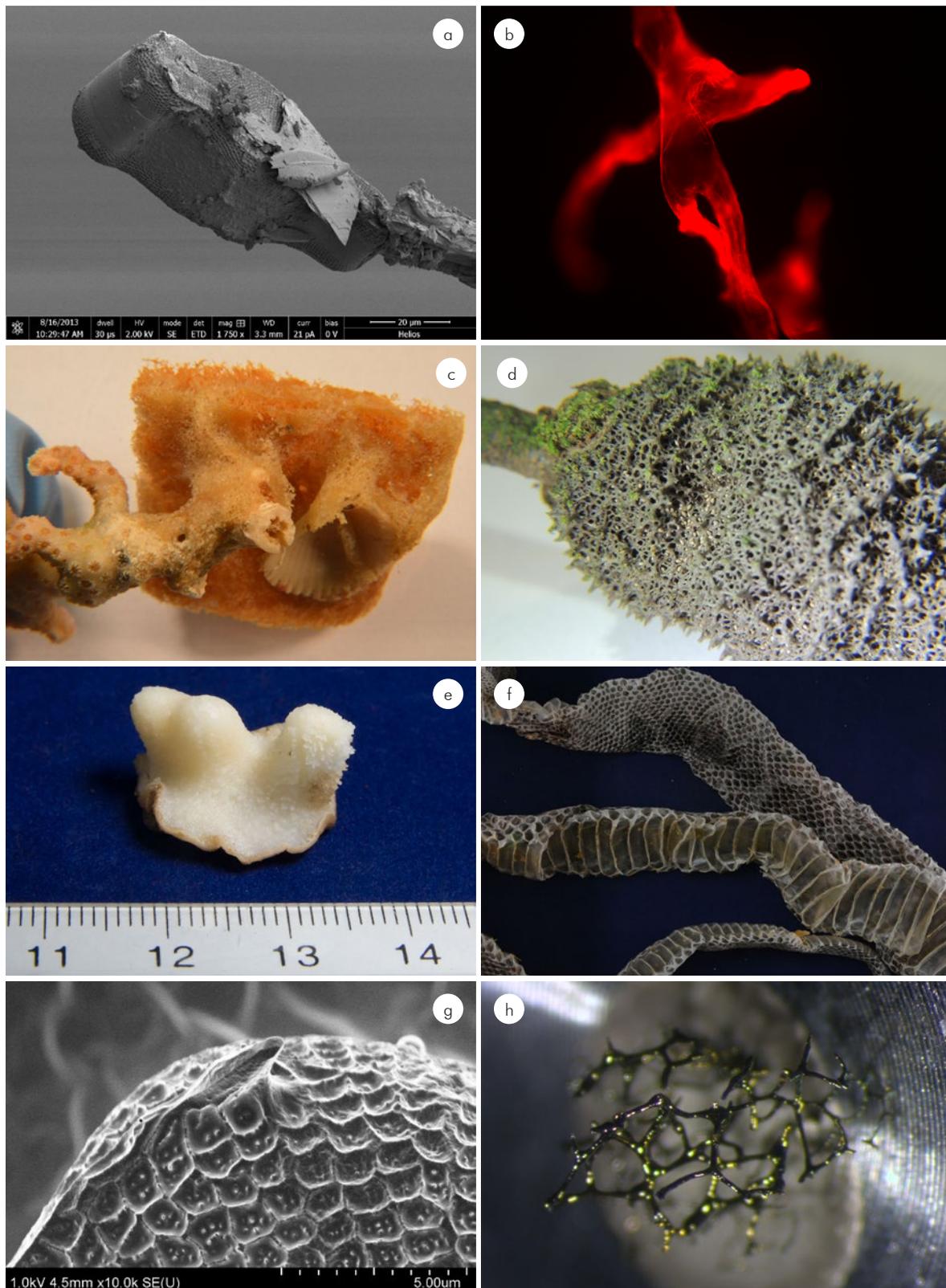


**Abbildung 1:** Prof. Hermann Ehrlich beim 11. Asiatisch-Pazifischen Chitin- und Chitosansymposium beziehungsweise beim 5. Symposium der „Indischen Chitin und Chitosan Society“ in Kochi (Indien).



**Abbildung 2:** Cover der 2016 erschienenen Aufsatzsammlungen.

ren Bedeutung für medizinische Anwendungen. Im Buch wird der aktuelle Stand der Schwammforschung, die Vielfalt der marinen Schwämme, ihre Toxikologie sowie deren pharmazeutische Bedeutung genauer diskutiert. Weiterhin werden durch Schwämme hervorgerufene Erosionserscheinungen und deren Bedeutung für aquatische Systeme sowie das bioaktive Potential Schwamm-assoziiierter Bakterien betrachtet. Herzstück des Buches ist die Dokumentation mehrerer hundert Schwammmetabolite und deren Bedeutung für die Pharmazie. Die



**Abbildung 3:** (a) Rasterelektronenmikroskopisches Bild einer Kieselalge der Art *Didymosphenia*. (b) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme (TexasRed-Filter) von Alpha-Chitin aus einem marinen Hornschwamm der Ordnung *Verongida*. (c) Symbiose einer Koralle, Molluske und eines Schwammes aus dem Mittelmeer. (d) Ein auf Bäumen lebender Süßwasserschwamm der Art *Druvia* aus dem Amazonasgebiet (Ordnung *Verongida*). (e) Koralle aus Australien. (f) Schlangenhäute, aus denen Keratin gewonnen wird. (g) Rasterelektronenmikroskopisches Bild der Nanoarchitektur einer Kieselalgenschale. (h) Metallisiertes Chitin marinen Ursprungs.

Metabolite umfassen Terpenoide, Heterocyclus, acetylenische Verbindungen, Steroide, Nukleoside sowie Alkaloide. Abschließend behandelt das Buch die Eigenschaften von in Schwämmen enthaltenen Biomaterialien, wie Kollagen und Chitin sowie deren Anwendung im *Tissue Engineering* und der medizinischen Diagnostik.

Die Aufsatzsammlung „The Boka Kotorska Bay Environment“ behandelt umfassend die Bedeutung und das medizinische und biotechnologische Potential mariner Schwämme der Bucht von Kotor. Die Bucht von Kotor ist eine 30 km lange fjordartige Bucht an der südöstlichen dalmatinisch-montenegrinischen Adriaküste. In Aquakultur werden dort Schwämme in ihrem natürlichen Lebensraum gezüchtet.

## Forschungstätigkeiten der Arbeitsgruppe

Die Forschungstätigkeiten der Arbeitsgruppe umfassen Fragestellungen zu unterschiedlichen Biomineralisationsprozessen der Natur- und Materialwissenschaft. Besonderes Interesse gilt der biomimetischen und biotechnologischen Nutzung von Metaboliten, Biomaterialien und Biomineralen mariner Hornkieselschwämme (Klasse *Demospongia*) und Glasschwämme (Klasse *Hexactinellida*). Marine Schwämme sind aus zwei Gründen von besonderem Forschungsinteresse: einerseits verfügen sie über eine hohe Reproduktionsrate und bilden in kurzer Zeit eine hohe Biomasse und zweitens bilden sie verschiedene chemische Substanzen, welche sich auf synthetischem Wege nicht oder nur mittels extremen Aufwand darstellen lassen. Die biomimetische Schwammforschung bildet somit eine Stütze für die Bereitstellung pharmazeutischer Grundstoffe aus nachwachsenden und somit ökologisch vertretbaren Quellen. Positiver Nebeneffekt der Nutzung mariner Schwämme sind die günstigeren Kosten im Vergleich zu klassischen chemischen Darstellungsverfahren. Um die marinen Arten zu erforschen, sind in den letzten fünf Jahren Labortechniken und Grundlagenforschungen voran gebracht worden, welche die Kenntnisse im Umgang mit diesen Lebewesen verbessern.

In aktuellen Untersuchungen werden verschiedenartige dreidimensionale Gerüststrukturen, sogenannte *Scaffolds*, aus den Schwämmen isoliert und diese in verschiedenartigen Synthesen (z. B. Hydrothermalsynthesen) und Immobilisierungen eingesetzt. Geeignete netzartige *Scaffolds* bestehen aus Chitin, Kollagen oder Polypeptiden. Besonderer Beachtung wurde 2016 auf die Optimierung bestehender Isolationsmethoden und die Erprobung zeitsparender Isolierungsmethoden gesetzt. Zudem werden die *Scaffolds* in unterschiedlichen Untersuchungen eingesetzt, beispielsweise zur gezielten Bildung nanostrukturierter Biokomposite oder in Untersuchungen zur Biokompatibilität mit lebenden Zellen. Weiterhin werden Metallisierungen an Gitterstrukturen durchgeführt, um neuartige katalytische Materialien für verschiedenartige Anwendungen zu entwickeln (siehe Abbildung 3).

Ein besonderer Höhepunkt im Jahr 2016 war die Veröffentlichung der Ergebnisse zu Untersuchungen des hawaiianischen Glasschwammes *Sericolophus hawaiiicus*. Dieser marine Schwamm produziert bei vier Grad Celsius Wassertemperatur eine bis zu hundert Mikrometer dicke Glasfaser. Industrielle Glasherstellungsverfahren benötigen rund 2000 Grad Celsius. In der vom Schwamm gebildeten Glasfaser werden durchgesendete Lichtimpulse verformt und dadurch das Lichtspektrum verbreitert. Dieser als Superkontinuum bezeichnete Effekt war bisher nur von künstlich erzeugten Glasfasern bekannt. Durch die erfolgte Aufklärung des mikro- und nanostrukturellen Aufbaus der Glasfasern könnte es in Zukunft möglich werden, bioinspirierte künstliche Glasfasern industriell bei niedrigen Temperaturen herzustellen.

Ferner werden Biomineralisationsprozesse von Kieselalgen untersucht. 2016 konnte die Kohlenstofffixierung der Kieselalge *Didymosphenia geminata* geklärt werden. Die Kieselalge lebt im flachen Wasser und bildet einen festen Stiel, damit sie nicht fortgespült wird. Durch enzymatische Reaktionen löst die Alge Kalzium aus dem Gestein und bildet durch Nutzung von Kohlenstoffdioxid aus der Luft feste, calcitische Nanofasern. Derzeit werden Untersuchungen durchgeführt, wie die Kieselalge durch

Kohlenstofffixierung zur Reduzierung des Treibhauseffektes beitragen könnte.

Immer weiter gewinnen Untersuchungen zu Makrobiomineralisationsprozessen in der Arbeitsgruppe an Bedeutung. In der Makrobiomineralisation werden Biomineralisationsprozesse größerskaliger Biominerale genauer betrachtet. Dazu erreichen größere Probenstücke wie beispielsweise riesige Walwirbel das Institut.

### Biohydrometallurgisches Zentrum für strategische Elemente

Im Rahmen des Biohydrometallurgischen Zentrums für strategische Elemente (BHMZ) wird in der Arbeitsgruppe ein Teilprojekt bearbeitet. Das BHMZ verfolgt das übergeordnete Ziel durch biologische Laugung mittels Bakterien Indium, Germanium und strategisch wichtige Elemente aus Gesteinskörpern zu gewinnen. Dazu ist auf der Reichen Zeche in Freiberg ein Versuchsstand installiert. Mehrere kleinere interdisziplinäre Teilprojekte untersuchen Aspekte wie die Laugungskinetik, die Geologie und Metallogenie von Indium- und Germaniumlagerstätten, Gewinnungs- und Anreicherungsverfahren sowie die technische Nutzung von Indium, Germanium und den Seltenen Erden. Das Teilprojekt, welches in der Arbeitsgruppe von Prof. Ehrlich bearbeitet wird, untersucht die Bildung nanostrukturierter Germanium-Biokomposite mittels biomimetischer Methoden. Erwünscht sind photolumineszierende Eigenschaften. 2016 wurde das Augenmerk auf *In-vivo*-Methoden gelegt. Dafür werden Organismen genutzt, die im natürlichen Umfeld selbst silikatische Strukturen bilden. Es wird untersucht, ob Germanium als Konkurrenz zu Silizium in natürlich gebildete Biominerale eingebaut wird. Dazu werden Kieselalgen, Süßwasserschwämme und Pflanzen kultiviert, die Biominerale isoliert und diese untersucht. Die Arbeiten dauern noch an.



Abbildung 4: Besprechung des BromMarin-Teams mit Prof. Alejandro Mayer der Universität Chicago (USA).

### Erste wirtschaftliche Anwendung von Forschungsergebnissen in der Ausgründung „BromMarin“

Das Gründungsteam von Andre Ehrlich, Stephan Meschke und Marcel Bürger hat 2016 die Räumlichkeiten der TU Freiberg endgültig verlassen und geht nun ihren eigenen Weg. Nach einer zweijährigen Begleitung durch ihren Mentor Prof. Hermann Ehrlich ist eine kommerzielle Gewinnung von Bromtyrosinen und chitinhaltigen *Scaffolds* aus marinen Schwämmen marktfähig. Das Produktangebot wurde im letzten Jahr weiter vergrößert und ist auf der Internetseite [www.brommarin.com](http://www.brommarin.com) einsehbar.

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

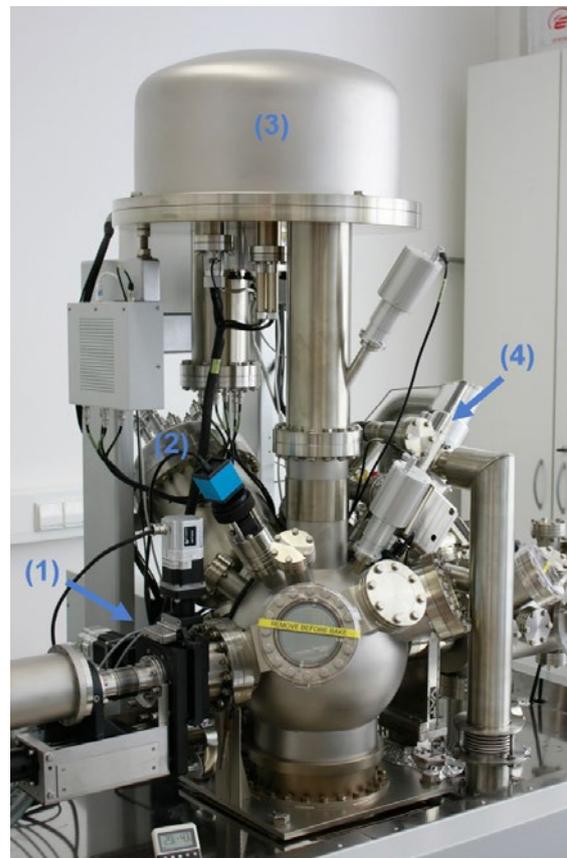
Die Arbeitsgruppe um Prof. Serguei Molodtsov, der die Position eines wissenschaftlichen Direktors am *European X-ray Free Electron Laser* (XFEL) in Hamburg ([www.xfel.eu](http://www.xfel.eu)) innehat, beschäftigt sich mit Materialwissenschaft sowohl an der TU Bergakademie Freiberg als auch am *European XFEL* (siehe Abbildung 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 in den Lehrplan der TU Bergakademie Freiberg aufgenommen wurde.



**Abbildung 1:** Mitglieder des Rektorats der TU Bergakademie Freiberg und Prof. Serguei Molodtsov im Beschleunigertunnel des *European XFEL* im April 2016 (© *European XFEL*).

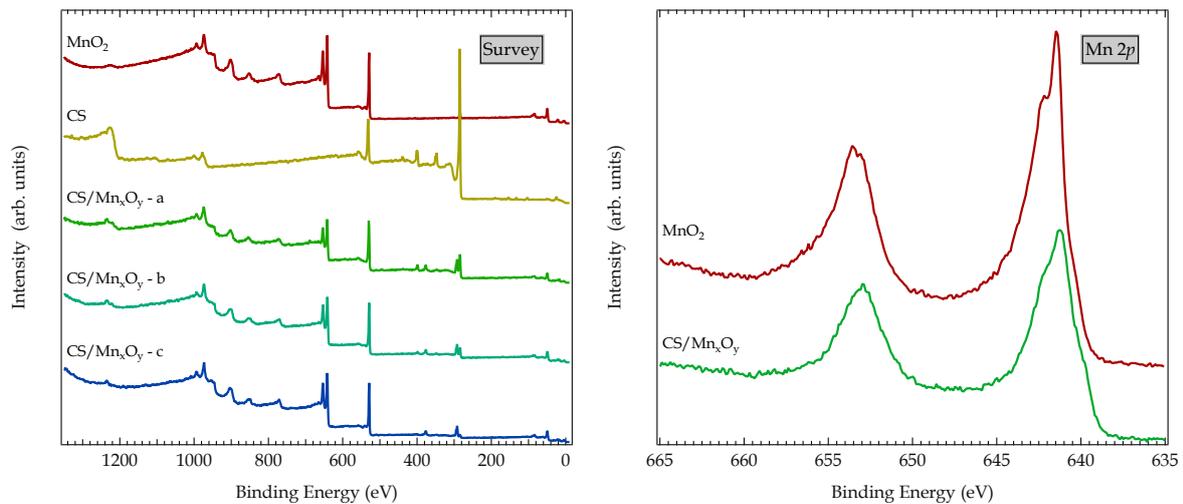
### Forschungstätigkeiten am Institut für Experimentelle Physik

Das Labor der Gruppe ist mit einem aktuellen Photoemissionsspektrometer ausgestattet, welches die Untersuchung der elektronischen Struktur verschiedenster Materialien zulässt. Das vorhandene Photoelektronenspektrometer ESCALAB 250Xi (siehe Abbildung 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 Avantage.



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

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe „Biomineralogie und Extreme Biomimetik“



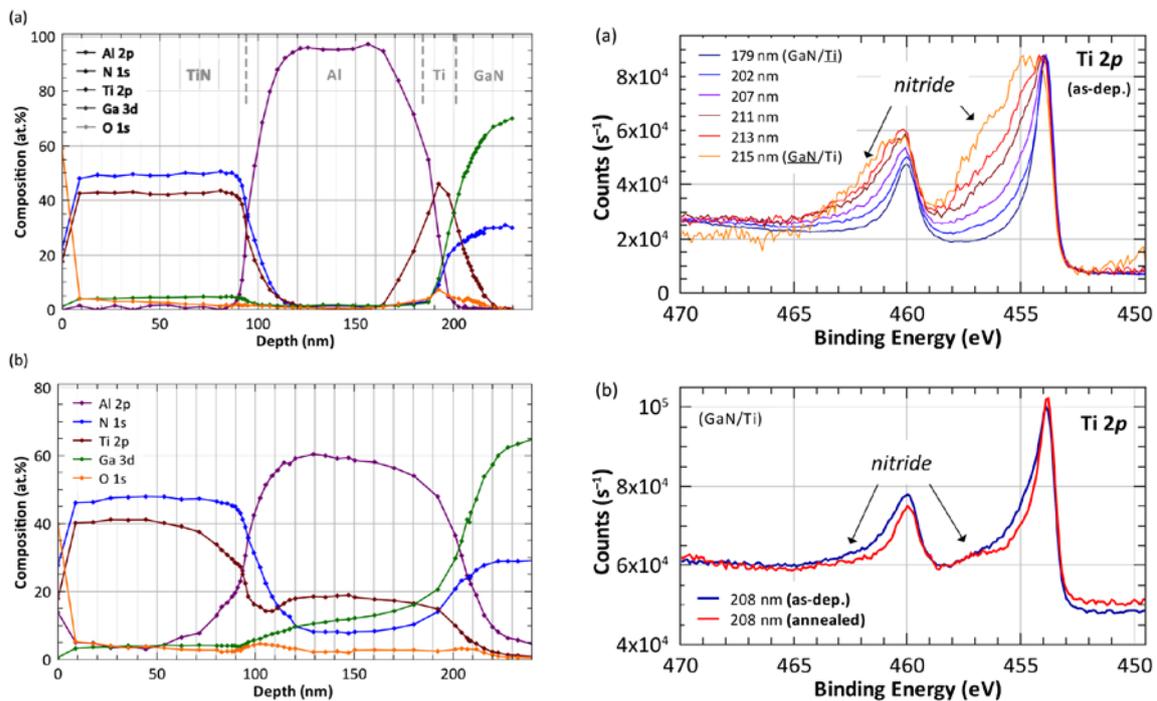
**Abbildung 3:** XPS-Übersichtsspektren (links) sowie Mn-2p-Rumpfniveau-Spektren (rechts) der untersuchten carbonisierten und MnO<sub>2</sub>-interkalierten Schwämme sowie einer MnO<sub>2</sub>-Referenz.

von Prof. Hermann Ehrlich wurden unter anderem die karbonisierten Skelette von Meeresschwämmen, welche mit MnO<sub>2</sub> interkaliert wurden und somit die Grundlage für elektrochemische Anwendungen bilden, untersucht. Mittels der XPS-Messung konnte gezeigt werden, dass der Oxidationszustand von Mangan sich bei der Interkalation des Schwammes, im Vergleich zu der MnO<sub>2</sub>-Referenzprobe nicht ändert. Als Resultat konnte eine physikalische Adsorption der MnO<sub>2</sub>-Partikel auf der dreidimensionalen Oberfläche des karbonisierten Schwammgerüsts als grundlegender Mechanismus postuliert werden (siehe Abbildung 3).

Eine weitere erfolgreiche Zusammenarbeit fand mit Valentin Garbe aus der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ von Prof. Dirk C. Meyer im Rahmen der ESF-Nachwuchsforschergruppe HALMA „Defekt-Engineering in Wide-Bandgap-Halbleitern für Anwendungen in der Opto- und Leistungselektronik“ statt. Dabei wurden Ti/Al/TiN-Stapel, welche ihr ohmsches Verhalten erst nach einem kurzen Temperschnitt bei rund 800°C zeigen, im zentralen Reinraumlabor mittels Sputtern auf GaN abgeschieden und mittels XPS untersucht. Zum Verständnis des Elektronentransports über den Halbleiter/Metall-Übergang wurde mittels XPS ein Tiefenprofil der Elementverteilung im Schichtstapel erstellt und der Kontaktstapel

vor und nach dem Temperschnitt verglichen (siehe Abbildung 4, links). Eine Auswertung der Bindungsenergien des Titans an der GaN/Ti-Grenzfläche zeigte, dass Ti schon während der Abscheidung und vor dem Tempern eine Bindung zum Stickstoff aus dem GaN-Kristall eingeht (siehe Abbildung 4, rechts). N-Leerstellen im GaN sind dafür bekannt, den Halbleiter unter dem Kontakt zu dotieren. Eine lokale Dotierung trägt zu einer geringeren Kontaktwiderstand bei. Bisher wurde vermutet, dass die Bildung einer TiN-Phase an der GaN/Ti-Kontaktfläche erst während des Temperschnittes stattfindet und hauptverantwortlich für die ohmsche Eigenschaft des Kontaktes ist.

Zusätzlich zu dem bereits bestehenden XPS-Spektrometer wird in naher Zukunft im Rahmen des Forschungsneubaus „Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung“ (ZeHS) ein neues Photoemissionsspektrometer beschafft und in Betrieb genommen. Der Fokus liegt dabei zum einen auf Probencharakterisierung mittels XPS bei hohen Temperaturen und zum anderen auf Untersuchung der elektronischen Eigenschaften im Valenzbandbereich mittels UV-Photoelektronenspektroskopie (UPS). Des Weiteren wird mit dem neuen Spektrometer winkelaufgelöste Photoelektronenspektroskopie möglich sein, um zum Beispiel die Bandstruktur der untersuchten Materialien zu bestimmen.



**Abbildung 4:** XPS-Tiefenprofile (links) für die in der Probe enthaltenen Elemente Ti, Al, N, Ga und O sowie die Al-2p-Rumpfniveauspektren an der Al/TiN-Grenzfläche, jeweils für die unbehandelte (a) und geheizte (b) Probe.

## Weitere nationale und internationale Forschungstätigkeiten

### Neue Forschungskooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

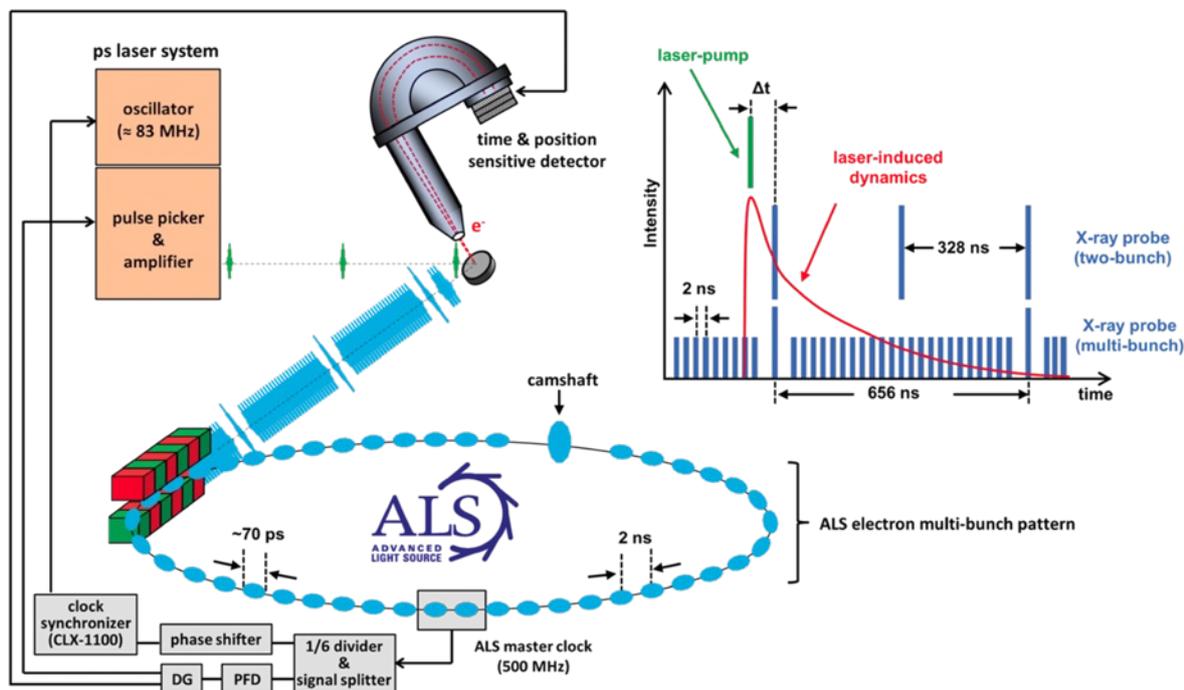
Zwischen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und Herrn Dr. Friedrich Roth besteht seit bereits vier Jahren eine enge Kooperation auf dem Gebiet der Erforschung der elektronischen Eigenschaften verschiedener Materialien mithilfe von Synchrotronstrahlung. Im Speziellen wurden in der Vergangenheit mithilfe der iDEEAA-Endstation die elektronische Struktur von organischen Heterostrukturen, welche Anwendung in der Photovoltaik finden, sowie deren Degradation bei Bestrahlung mit sichtbarem Licht untersucht. Darüber hinaus wurden intensive Untersuchungen des Einflusses der Endzustände auf den Photoemissionsprozess sowie die Bandstruktur durchgeführt.

Die PTB als nationales Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben führt im Rahmen ihrer satzungsgemäßen Aufgaben u. a. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

auf dem Gebiet Radiometrie und Spektrometrie mit Synchrotronstrahlung durch. Die Forschungstätigkeit am Institut für Experimentelle Physik im Rahmen der Professur für Strukturforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs) und Synchrotronstrahlung beinhaltet die methodische Weiterentwicklung der grundlegenden und applikationsorientierten Elektronenspektroskopie mithilfe von Synchrotronstrahlung.

In der nun geschlossenen Vereinbarung über eine gemeinsame Kooperation soll eine Optimierung der genannten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben erreicht werden. Weiterhin soll es Freiburger Wissenschaftlern und Studenten ermöglicht werden, Forschungstätigkeiten an der „Metrology Light Source“ (MLS) in Berlin durchzuführen.

Ferner wurde vereinbart, die bisherigen Aktivitäten und hier insbesondere den Austausch von wissenschaftlichen Nachwuchskräften unvermindert fortzusetzen und auszubauen sowie in Zukunft Gastvorträge von Wissenschaftlern beider Institutionen zu veranstalten.



**Abbildung 5:** Funktionsskizze des Pikosekunden-zeit aufgelösten Pump/Probe-Experiments an der *Advanced Light Source* in Berkeley (USA) aus S. Nepple *et al.*: „Capturing interfacial photoelectrochemical dynamics with picosecond time-resolved X-ray photoelectron spectroscopy“, *Faraday Discussions* 171 (2014) 219.

Im Rahmen dieser Forschungskoope-ration konnten bereits erste Ergebnisse erzielt und in Journals wie dem *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* und *Nanotechnology* veröffentlicht werden.

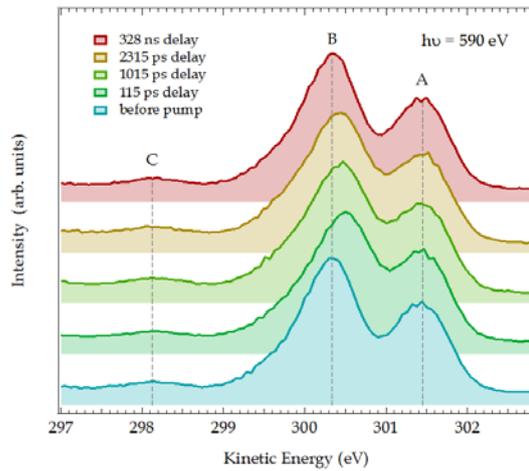
An der MLS, speziell am IDB-Strahlrohr, kann monochromatisierte Strahlung im Bereich von 1,5 eV bis 280 eV bei einem mittleren Photonenfluss von  $10^{12}$  Photonen/s (Ringstrom von 100 mA) genutzt werden. Die iDEEAA-Endstation ist mit einem R4000 Analysator von Scienta ausgestattet, mit dessen Hilfe bei einer Passenergie von 20 eV typische Energieauflösungen von 15 meV erreicht werden.

Ferner ist die Endstation mit einem Kryostaten ausgestattet, welcher es erlaubt, Proben sowohl zu kühlen (bis zu 20 K) als auch zu heizen (bis maximal 450 K). Zur Probenpräparation steht eine Präparationskammer zur Verfügung, welche mit unterschiedlichsten Werkzeugen (wie zum Beispiel *Sputter Gun*, *Heating Stage*, LEED und verschiedenen Verdampfern) ausgestattet ist.

### Forschungskoope-ration mit dem *Lawrence Berkeley National Laboratory* und der *Advanced Light Source*

Seit 2014 besteht zwischen Herrn Dr. Friedrich Roth und Herrn Dr. Oliver Gessner, welcher eine Arbeitsgruppe am *Lawrence Berkeley National Laboratory* in Berkeley (USA) leitet, eine sich stetig weiterentwickelnde und vertiefende Kooperation. Grundlage ist der Aufbau sowie die Nutzung von zwei neuartigen *Endstations* an der *Advanced Light Source* (ALS). Beide Methoden befassen sich mit der Untersuchung der Dynamiken von Ladungstransferprozessen im Pikosekunden-Bereich, wobei der Fokus zum einen auf der Röntgenphotoelektronenspektroskopie und zum anderen auf Röntgenabsorptionsspektroskopie liegt.

In beiden Fällen wird zur Anregung der Probe ein, mit der ALS synchronisierter, externer Laser genutzt, mit dessen Hilfe die Proben wahlweise mit Photonen der Wellenlänge 1064 nm, 532 nm oder 355 nm bestrahlt werden können. Im Anschluss wird die Probe mittels der Röntgenphotonen der ALS analysiert,



**Abbildung 6:** Zeitaufgelöste XPS-Spektren für ein System aus zwei Monolagen  $C_{60}$  auf einen CuPc-Dünnschicht bei unterschiedlichen Pump-Probe-Delays.

wobei – begrenzt durch die zeitliche Auflösung des Synchrotrons (ca. 60 ps) – der zeitliche Versatz zwischen Laser Pump und X-ray Probe variabel eingestellt werden kann (siehe Abbildung 5).

In ersten Experimenten wurden die Dynamiken des Ladungstransfers zwischen Phthalocyanin- und  $C_{60}$ -Molekülen (ein Prototypsystem für organische Photovoltaik) untersucht. Dabei konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass induzierte Ladungstrans-

ferdynamiken ortsspezifisch mittels zeitaufgelöster XPS beobachtbar sind. Dabei wurde der Transfer eines Elektrons vom Donator (CuPc) zum Akzeptor ( $C_{60}$ ) anhand der zeitlichen Veränderung des C-1s-Rumpfniveauspektrums nachgewiesen. Die Ankunft eines Elektrons am  $C_{60}$  wurde durch eine komplett reversible und transiente Verschiebung des dem  $C_{60}$  zugehörigen C-1s-Rumpfniveaus beobachtet (siehe Abbildung 6), wohingegen das C-1s-Niveau des CuPc unverändert blieb.

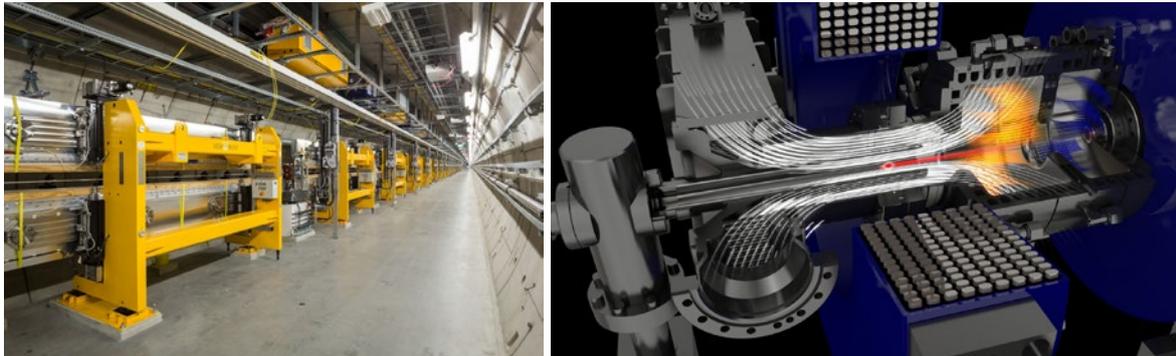
Auf Grundlage eines positiv bewerteten ALS Approved Program (AP) werden bei regelmäßigen Messzeiten in den kommenden Jahren beide Methoden (tr-XPS und tr-XAS) weiter verbessert und auf neue Stoffsysteme angewendet.

## Forschungs- und Bautätigkeiten am European XFEL

In der Metropolregion Hamburg entsteht derzeit eine internationale Forschungseinrichtung der Superlative (siehe Abbildung 7). Der Röntgenlaser European XFEL wird 27.000 Lichtblitze pro Sekunde erzeugen, mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquel-



**Abbildung 7:** European XFEL mit den drei Betriebsgeländen Schenefeld (Experimentierhalle), Osdofer Born sowie DESY-Bahnhof. Die Gesamtlänge der Anlage beträgt 3,4 km (© European XFEL).



**Abbildung 8:** Undulator im Tunnel XTD2, aufgenommen im März 2016 (links). Elektroneninjektor, bei dem die Elektronenpakete mittels eines optischen Lasers erzeugt werden (rechts). (© European XFEL)

len herkömmlicher Art. Damit eröffnet er völlig neue Forschungsmöglichkeiten. Wissenschaftlerteams aus 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 Mai 2017 liefern zu können. Der Nutzerbetrieb wird 2017 beginnen 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.

### Meilensteine 2016

Im März 2016 wurden die 35 Segmente des ersten von insgesamt drei Undulatoren installiert (siehe Abbildung 8, links). Jeder dieser Undulatoren ist 210 m lang und wird Röntgenstrahlung mit einer Intensität, die um mehrere Größenordnungen höher ist, als die von konventionellen Röntgenquellen, erzeugen. Am 29. Juni 2016 wurde das neue Hauptgebäude in Schenefeld (Schleswig-Holstein) mit

einem Festakt eröffnet. Ende Juli wurde ein 7-monatiger Testbetrieb der ersten Sektion des Teilchenbeschleunigers (insbesondere des Elektroninjektors) erfolgreich abgeschlossen (siehe Abbildung 8, rechts). Dabei konnten, wie geplant, 10-mal pro Sekunde 2700 Elektronenpakete mit hoher Qualität erzeugt werden. Im Anschluss an diese Testphase wurde der Elektroneninjektor mit dem Hauptteil des Beschleunigers verbunden.

Im September 2016 wurde der 1,7 km lange supraleitende Beschleuniger fertiggestellt. Er dient dazu die Elektronenpakete, welche sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen, auf 17,5 GeV zu beschleunigen. Verantwortlich für die Konstruktion sowie den Aufbau des Beschleunigers ist ein internationales Konsortium aus 17 Institutionen unter der Führung des DESY. Am 6. Oktober wurde mit der Inbetriebnahme des gesamten, 3,4 km langen, *European XFEL* begonnen. Es ist geplant alle Tests bis Mitte 2017 abzuschließen und im September 2017 mit den ersten Nutzerexperimenten zu beginnen.

## Lehre in Hamburg

### Rückblick Blockvorlesung 2016

Bereits zum zweiten Mal in Folge nahmen die Studierenden unter der Leitung von Prof. Serguei Molodtsov sowie Dr. Friedrich Roth an einem umfangreichen Wahlpflichtmodul über die Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern teil. Der einwöchige Kurs zeigte den Studenten die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten eines Röntgenlasers



**Abbildung 9:** Sieben Master-Studierende der TU Freiberg absolvierten im Jahr 2016 die einwöchige Blockvorlesung am *European XFEL*.

auf, wie zum Beispiel die Nutzung in der Materialforschung und -entwicklung von katalytischen, magnetischen sowie biologischen Stoffen und Hybrid-Strukturen.

In Hamburg erlangten die Studierenden vertiefte Kenntnisse über den Aufbau und die Anwendung der neuesten Generation von Röntgen-Lichtquellen. Weiterhin lernten sie Messmethoden kennen, bei denen die ultrakurzen Laserlichtblitze im Röntgenbereich eingesetzt werden. Dabei werden bis zu 27.000 Mal in der Sekunde Röntgenpulse mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art, genutzt. „Die einzelnen Vorlesungen waren sehr gut strukturiert und so gestaltet, dass man einen großen Überblick über die Experimente und Möglichkeiten beim *European XFEL* erlangte“, stellte Christian Radach, Masterstudent im Fach Angewandte Naturwissenschaften, fest. Die Teilnehmer lobten zudem die hervorragende Organisation der gesamten Blockvorlesung sowie die fachlich fundierten Vorlesungen der leitenden Wissenschaftler am *European XFEL*.

Im Rahmen der Blockvorlesung besuchten die Studierenden auch die vor kurzem fertiggestellte Experimentierhalle vom *European XFEL* in Schenefeld (siehe Abbildung 9), die DESY Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle PETRA III und den weltweit ersten Freie-Elektronen-Röntgenlaser FLASH, ebenfalls bei DESY.

### Ankündigung Blockvorlesung 2017

Die nächste Blockvorlesung „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs)“ ist vom 24. bis 29. September 2017 in Hamburg geplant (siehe Abbildung 10). Die Vorlesungsreihe zeigt die Darstellung von konventionellen und ultrahoch-zeitaufgelösten 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 mehrerer Führungen durch den ersten Freie-Elektronen-Röntgenlaser überhaupt, 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 Röntgen-Lichtquellen, den Freie-Elektronen-Röntgenlasern. Die FELs erzeugen Röntgenstrahlung mit sehr hoher Brillanz.

Verschiedene experimentelle Methoden und ihre besonderen Möglichkeiten, die nur mit 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 zu sammeln.

Unterbringung im DESY-Gästehaus, Fahrt- und Übernachtungskosten werden übernommen.

Die Studenten können sich gerne anmelden bei:

- [friedrich.roth@physik.tu-freiberg.de](mailto:friedrich.roth@physik.tu-freiberg.de) oder
- [falk.meutzner@physik.tu-freiberg.de](mailto:falk.meutzner@physik.tu-freiberg.de)



Abbildung 10: Ankündigung der Blockvorlesung 2017 am DESY in Hamburg.

### **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-Röntgenlasern, 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 (sowohl Master als auch Ph.D.) 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 Strukturen, der geometrischen Größe/Form wie auch der elektronischen Struktur basierend auf Messungen der Interaktion von Nanoobjekten mit Elektronen und Röntgenlicht.
- Untersuchung der dynamischen Prozesse im Festkörper sowie an dessen Oberflächen mit hoher zeitlicher Auflösung.
- Organisation von internationalen Ausbildungsprogrammen.

Weitere Informationen: <http://unifel.ifmo.ru/en>.



## Arbeitsgruppe Jun.-Prof. Roman Gumeniuk

### „Kristallphysik“

Thermoelektrische (TE) Generatoren (TEG) sind Halbleitersysteme, die Abwärme in elektrische Energie umwandeln. Solche Systeme haben ein großes Potenzial sowohl wichtige Beiträge zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>- und Treibhausgasemissionen als auch zur effizienteren Energienutzung zu leisten. Festkörperenergieumwandlung hat große Attraktivität aufgrund ihrer Einfachheit im Vergleich zu Systemen, die zweiphasige (Gas/Flüssigkeit) Arbeitsfluide komprimieren und entspannen müssen. Erfolgreiche Anwendungen der TEG basieren auf ihren kleinen Dimensionen, der Robustheit in anspruchsvollen Umgebungen und der kurzen Reaktionszeit. TE-Materialien für eine industrielle Anwendung sollten einen hohen Schmelzpunkt besitzen sowie leicht herstellbar und im Betriebtemperaturbereich strukturell stabil sein. Zusätzlich sollten die Bestandteile der Materialien ausreichend verbreitet und billig sein. In dieser Hinsicht sind kostengünstige schwefelhaltige Mineralien – natürliche und künstlich-erzeugte – von besonderem Interesse. Es folgt eine Übersicht über die Materialien, die im Fokus unserer Arbeitsgruppe sind.

Hollandit ist ein selten vorkommendes Mineral mit der idealisierten Zusammensetzung  $\text{Ba}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_{16}$  und monokliner Kristallstruktur. In dieser Struktur bilden die kantenverknüpften Oktaeder ( $\text{MnO}_6$ ) einen pseudo-quadratischen Rahmen mit großen Kanälen, die mit verschiedenen Kationen gefüllt werden können. Ein ähnliches Strukturmotiv ist im  $\text{InTi}_5\text{S}_8$ -Typ gefunden worden (siehe Abbildung 1) – daher sind solche Verbindungen als Pseudo-Hollandite bekannt. Sie zeigen hohe  $ZT$ -Werte ( $ZT = 0,5$  für  $\text{TiCr}_5\text{Se}_8$  [1]) und sind daher Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Zukünftig sollen Pseudo-Hollandite  $\text{ATM}_5\text{S}_8$  ( $A = \text{Ba}, \text{Sr}, \text{In}$ ;  $\text{TM} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$ ) synthetisiert und ihre thermoelektrischen Eigenschaften untersucht werden.

Die Verbindungen  $\{\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Fe}\}\text{In}_2\text{S}_4$  kristallisieren mit flächenzentriertem  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ -Strukturtyp, bekannt

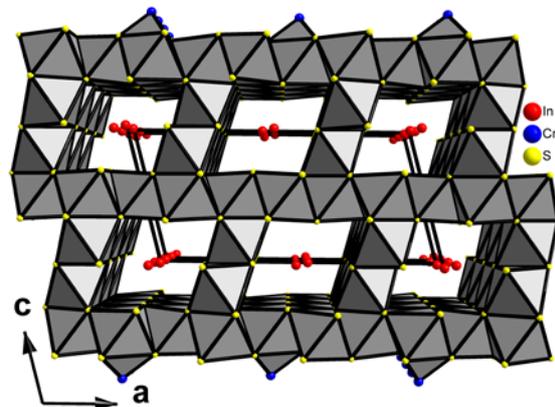


Abbildung 1: Kristallstruktur von  $\text{InCr}_5\text{S}_8$  in Pseudo-Hollandit-Struktur.

auch als natürliches Mineral Spinell (siehe Abbildung 2). In-S-Spinelle [2] wurden wegen ihrer interessanten magnetischen Eigenschaften intensiv untersucht. Allerdings sind ihre thermoelektrischen Charakteristika weniger bekannt. In unserer Forschung an Thermoelektrika sind oben genannte Materialien mittels Gastransportreaktionen als Kristalle synthetisiert und ihre thermoelektrischen Eigenschaften untersucht worden.

Kleine Dimensionen und Integration in mikroelektronische Bauteile werden durch integrierte Dünnschichtsysteme, sogenannte  $\mu\text{TEGs}$  realisiert, bei denen das thermoelektrische Material 100 nm bis einige Mikrometer dick sein kann.

Die Bewertung neuer potentieller thermoelektrischer Materialien erfolgt über Messungen des Wärmetransports und der elektrischen Leitfähigkeit. Für die thermoelektrische Charakterisierung dünner Schichten müssen das Substrat sowie die Probengeometrie berücksichtigt werden.

Ziel unserer Arbeitsgruppe ist es weiterhin, eine Teststruktur für thermoelektrische Messungen an dünnen Schichten herzustellen, zu testen und zu bewerten. Hierzu wird das gut untersuchte SiGe als Referenz-Thermoelektrikum verwendet. Die Messstrukturen

basieren auf der weitverbreiteten Van-der-Pauw-Struktur [3], die zur Messung des elektrischen Widerstandes genutzt wird. Diese Struktur soll für thermoelektrische Messungen modifiziert werden. Die Herstellung der thermoelektrischen Schichten und der Messstrukturen erfolgt im Zentralen Reinraumlabor der TU Bergakademie Freiberg.

#### Referenzen

- 1 H. Takahashi et al.: Chemistry of Materials 25 (2013) 1809.
- 2 I. V. Bodnar et al.: Semiconductors 43 (2009) 1510.
- 3 J. de Boor et al.: Applied Physics Letters 99 (2011) 022102.

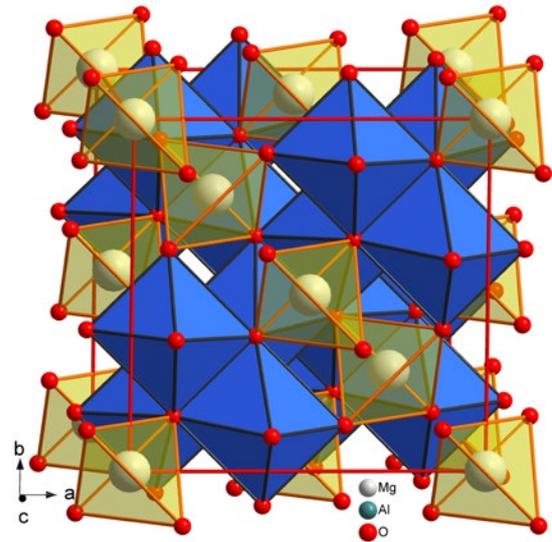


Abbildung 2: Kristallstruktur von Spinell  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ .

## 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. Seit Ablauf der Projektzeit der Landesexzellenzinitiative im Februar 2014 wird das MKEM als eigene Einheit im Institut für Experimentelle Physik unter persönlicher Förderung von Prof. Dr. Dirk C. Meyer 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.

Für das 2015 vom Deutschen Wissenschaftsrat bewilligte Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) dienten die Kompetenzzentren, die innerhalb der Landesexzellenzinitiative ADDE auf unterschiedlichen Fachgebieten für die gesamte TU Bergakademie eingerichtet wurden, als Vorbild für die Koordinationsstellen Materialien und Eigenschaften sowie Material- und Bauteil-Simulation des ZeHS. Seit August 2016 laufen die Planungen für den Forschungsneubau, der das ZeHS beherbergen soll, auf Hochtouren. Für diese Planungen, die Arbeitsgruppen aus allen Fakultäten involvieren, übernimmt Frau Dr. Abendroth den Austausch und

die Koordination zwischen den zukünftigen Nutzern einerseits sowie dem Bauherren (SIB, Freistaat Sachsen) und Architekten und Fachplanern andererseits.

### 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 zusammen mit der Leiterin des MKEM Dr. Barbara Abendroth das wissenschaftliche Leitungsgremium. Der Reinraum verfügt über 300 m<sup>2</sup> 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 weitere 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 und überregionalen Schulen wahrgenommen, so z. B. auch im Rahmen des alljährlichen Girlsday. Impressionen von diesem Tag sind in den Abbildungen gezeigt. Die Schülerinnen absolvieren Versuche zur Herstellung von MOS-Kondensator-Strukturen. Dieses Schülerpraktikum entspricht einer Kurz-Version des Halbleiter-Praktikums, welches die Studenten der Angewandten Naturwissenschaft und der Nanotechnologie über ein volles Semester ablegen.



Abbildung 1: Zum Girlsday am 28.04.2016 arbeiteten Mädchen der Klassenstufe 10 mit dem Betreuer David Lehninger im ZRL.

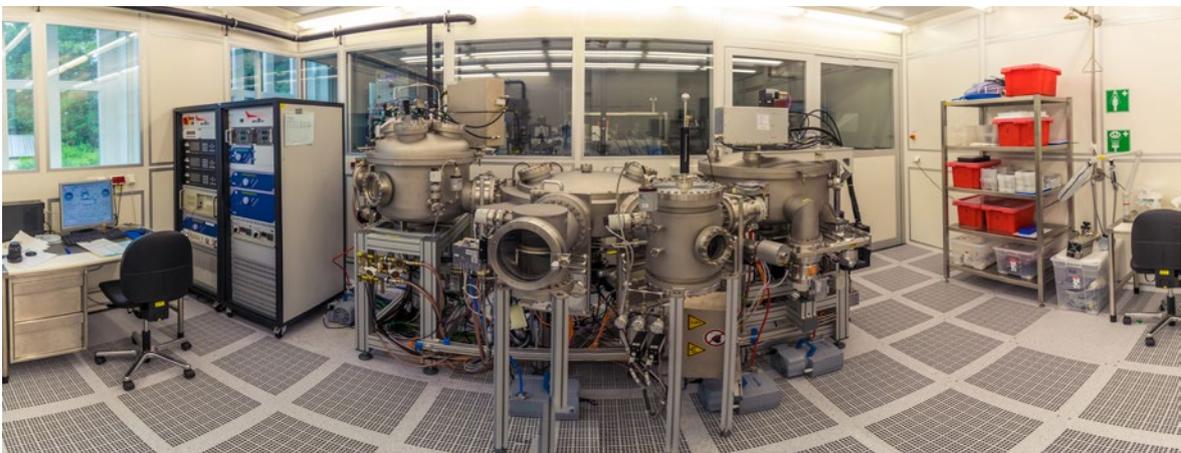


Abbildung 2: Blick auf die Magnetron-Sputteranlage im ZRL.

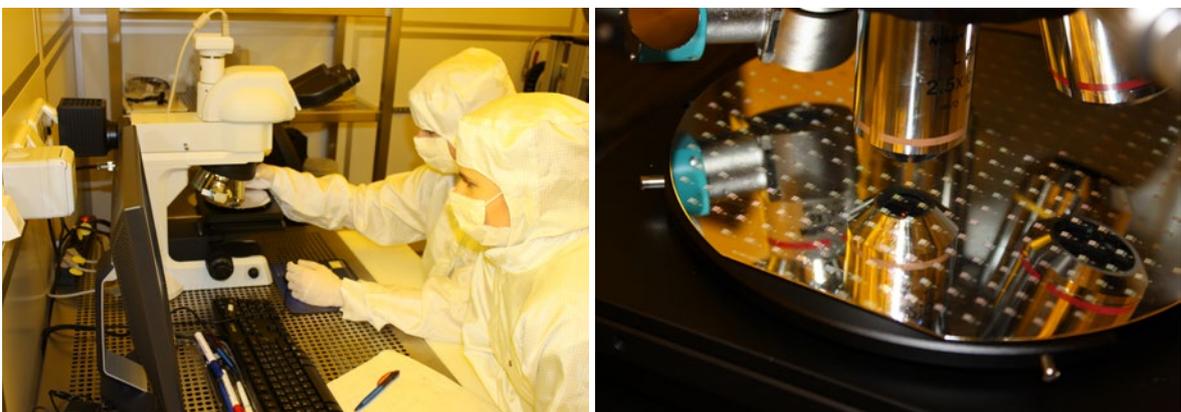


Abbildung 3: Die Resultate der Lithographie wurden am Mikroskop im ZRL überprüft.

## Methodisches Kompetenzzentrum Energiematerialien

Das Kompetenzzentrum Energiematerialien setzt etablierte und moderne Methoden der Kristallographie zur Schaffung neuer technologischer Ansätze und Lösungen in der Elektrochemie ein (siehe Abbildung 1). Zudem bündelt es 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. Vorhandene experimentelle und theoretische Möglichkeiten und Kompetenzen beziehen sich auf:

- FIB-Präparation von Einkristallen,
- Kristallorientierungsbestimmung,
- Röntgeneinkristalldiffraktometrie,
- Röntgenographische Bestimmung von Elektronendichten,
- $N$ -dimensionale Kristallographie,
- *Maximum-Entropy*-Methode,
- Geometrische und topologische Methoden in Kristallchemie und Materialforschung,
- Strukturmodellierung: Dichtefunktionaltheorie, *Bond-Valence*-Methode.

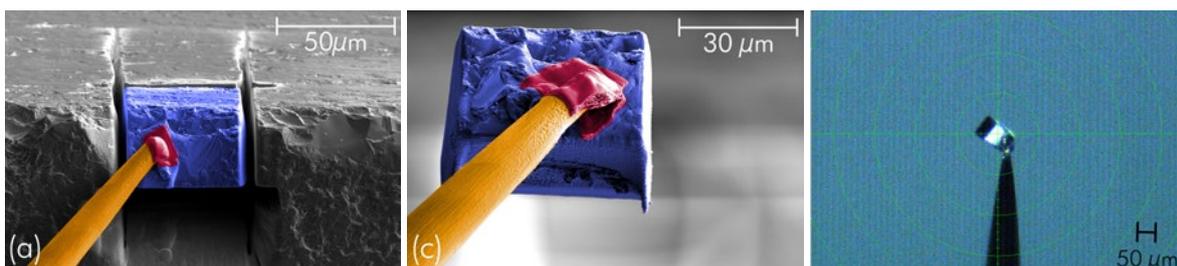
Insbesondere bilden experimentell bestimmte Elektronendichten die Schnittstelle zu theoretisch berechneten. Damit versteht sich das Kompetenzzentrum als Schnittstelle zwischen den theoretischen und experimentellen Arbeiten des IEP und damit



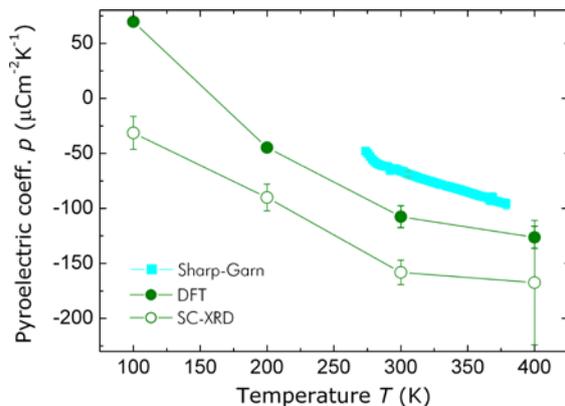
**Abbildung 1:** Mit kristallographischen Methoden zu neuen Energiematerialien.

zwischen der elektronischen Struktur und den chemischen bzw. physikalischen Eigenschaften. Im Fokus der Arbeiten stehen vorzugsweise einkristalline Materialien mit komplexen Strukturen aus den Bereichen der Energie- und Stoffwandlung: Oxide, intermetallische Phasen und organische Verbindungen. So wurden zurückliegend neben methodischen Arbeiten zur Röntgendiffraktometrie insbesondere Materialien für Elektroden und Festelektrolyte für neuartige Ansätze elektrochemischer Energiespeicher, pyroelektrische Kristalle und Farbstoffe für organische Solarzellen bearbeitet.

Wichtige Arbeiten in 2016 bezogen sich auf die Stoffsysteme Lithiumniobat und Lithiumtantalat. Beide gehören zur Klasse der pyroelektrischen Materialien. Im Zentrum der diesbezüglichen Masterarbeit von Tina Weigel stand die temperaturabhängige Bestimmung der Strukturparameter und Elektronendichten. Es war das Ziel, den pyroelektrischen Koeffizienten auf mikroskopischer und makroskopischer Skala zu bestimmen sowie Realstruktureinflüsse zu



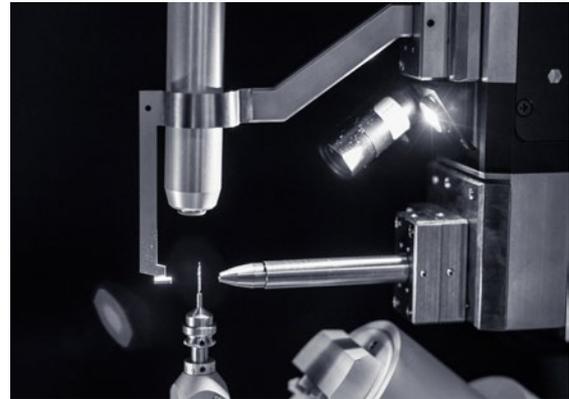
**Abbildung 2:** Mittels FIB präparierter Lithiumniobat-Einkristall im REM (links und Mitte) sowie auf einem Glasfaden fixiert (rechts).



**Abbildung 3:** Temperaturabhängiger pyroelektrischer Koeffizient eines  $\text{LiNbO}_3$ -Kristalls. Bestimmung mittels Sharp-Garn-Methode, aus dichtefunktionaltheoretischen Rechnungen (DFT) und aus Röntgeneinkristallbeugungsdaten (SC-XRD).

untersuchen. Dementsprechend wurden parallel zu den Beugungsuntersuchungen Eigenschaftsmessungen und theoretische Modellierungen mittels Dichtefunktionaltheorie durchgeführt (siehe Abbildungen 2 bis 4). Die Arbeiten erfolgten in Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Thomas Doert und Dr. Martin Kaiser vom Institut für Anorganische Chemie II der TU Dresden sowie mit Dr. Axel Lubk vom Institut für Strukturphysik der TU Dresden.

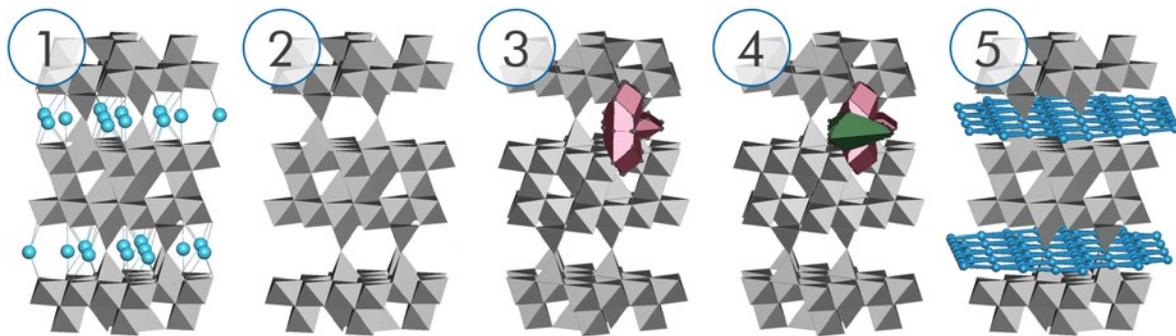
Die Masterarbeit von Tina Weigel bildete zudem die Grundlage für die erfolgreiche Einwerbung eines Federmann-Stipendiums, welches zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und dem Ausbau der Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Institutionen in Israel verliehen wird. Tina Weigel wird 2017 einen sechsmonatigen Aufenthalt an der *Bar-Ilan-University*, im *Department of Chemistry*, in der Arbeitsgruppe von Prof. Doron Aurbach, einem weltweit führenden Wissenschaftler im Bereich der elektrochemischen Energiespeicher, bei röntgenographischen Untersuchungen neuartiger kristalliner Batteriematerialien sowie der Konzeption einer elektrochemischen Zelle für die *In-situ-/Operando*-Röntgendiffraktometrie mitwirken. Damit wird zum zweiten Mal nach 2015 ein Mitarbeiter (in diesem Falle eine Mitarbeiterin) des IEP innerhalb der Arbeitsgruppe von Prof. Doron Aurbach einschlägige Erfahrungen im Bereich der Elektrochemie sammeln. Falk Meutzner, der ebenfalls Federmann-Stipendiat war, besuchte die Arbeitsgruppe bereits im



**Abbildung 4:** Röntgendiffraktometer Bruker D8 Quest für die Röntgenbeugung zur Bestimmung von Kristallstrukturen und Elektronendichten an Einkristallen.

Rahmen seiner Doktorandentätigkeit und forschte an der Herstellung und Charakterisierung von Interkalationsmaterialien für Post-Lithium-Systeme.

Zum Auffinden von Materialien für neue Konzepte elektrochemischer Energiespeicher werden vom IEP seit 2014 verschiedene Methoden der Kristallchemie eingesetzt und miteinander kombiniert. Ein leistungsstarker Ansatz ist die Voronoi-Dirichlet-Partitionierung (siehe Abbildung 5). Diese ermöglicht die Untersuchung und Systematisierung von Kristallstrukturen. Eine Kristallstruktur kann dadurch in atomare Domänen, sogenannte Voronoi-Dirichlet-Polyeder (VDP), zerlegt werden. Jeder VDP ist durch sein Volumen, seine Flächen, Ecken und Kanten charakterisiert, wobei diese als die chemischen Eigenschaften Atomgröße, Bindungsstärke, strukturimmanente Hohlräume und Kanäle interpretiert werden können. Das Programmpaket ToposPro nutzt diesen Ansatz und erlaubt ganze kristallographische Datenbanken damit zu bearbeiten. Eine Anwendung besteht beispielsweise im Auffinden charakteristischer Netzwerke, die im Falle von Ionenleitermaterialien das Ionenleitfähigkeitsnetzwerk darstellen. Entsprechende Untersuchungen erfolgten im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts CryPhys-Concept (03EK3029A) zum Auffinden von Na- und Al-Ionenleitern. Falk Meutzner, der diese Methode insbesondere für die Bearbeitung von Ionenleitern einsetzt, ist seit 2016 offizieller ToposPro-Experte (<http://topospro.com>).



**Abbildung 5:** Graphische Darstellung der Voronoi-Dirichlet-Partitionierung zum Auffinden von Leitfähigkeitsnetzwerken in Festelektrolytmaterialien.

Das Verbundprojekt CryPhysConcept wurde, nach mehr als drei Jahren Laufzeit, erfolgreich in 2016 beendet. Wichtige Ergebnisse des Vorhabens, insbesondere des IEP, betreffen die Systematisierung, Kategorisierung und Entwicklung eines Bewertungsalgorithmus für Energiespeichermaterialien sowie eine Strategie zum Auffinden von Festkörperionenleiter- und Interkalationsmaterialien für aussichtsreiche Post-Lithium-Konzepte. Weiterhin wurden verschiedene Konzepte auf Basis neuer Energie- und Materialwandlungsansätze entwickelt und patentiert:

- ein *All-solid-state-all-in-one*-Batteriematerial,
- ein „Verfahren zur Herstellung von auf Silizium basierenden Anoden für Sekundärbatterien“ (DE 10 2016 001 949.2) – unter Federführung von Dr. Charaf Cherkouk ist hierzu ein Forschungsvorhaben ausgearbeitet worden, welches in 2017 starten soll,
- die Untersuchung von Biomineralien, wie etwa Chitin, zur Verbesserung von elektrochemischen Energiespeichern,
- das Einbeziehen elektrochemisch aktiver Materialoberflächen,
- Modifizierungsverfahren von Festelektrolytmaterialien und
- die Schaffung von Ansätzen auf Basis hochvalenter Ionen.

Zudem wurde eine Zusammenarbeit mit dem *Department of Materials Science and Engineering*, Gruppe Prof. Stefan Adams, der *National University of Singapore* aufgenommen.

Im September 2016 wurden die Arbeiten im Rahmen des BMBF-Verbundprojekt „R2RBattery“ begonnen.

Ziel ist es, ein Post-Lithium-Energiespeichersystem auf Basis hochvalenter Ionen in Kooperation mit lokalen Industrie- und Forschungspartnern zu entwickeln und maßgeschneiderte Lösungen für deren potentielle großtechnische Produktion zu erarbeiten. Innerhalb der nächsten drei Jahre werden insgesamt vier Verbundpartner unter Leitung der TU Bergakademie Freiberg (Kordinator: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Projektmanager: Dr. Tilmann Leisegang) an der Umsetzung dieser neuen Post-Lithium-Ansätze für die elektrochemische Energiespeicherung arbeiten und damit die Arbeiten des Projekts CryPhysConcept weiterführen.

Weitere Arbeiten in 2016 bezogen sich auf die Nachbereitung der 2<sup>nd</sup> *International Conference on Electrochemical Storage Materials* (EStorM 2015). So wurde der nunmehr zweite Band der *AIP-Proceedings* unter dem Titel „*Electrochemical Storage Materials: Supply, Processing, Recycling and Modeling – Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials*“ veröffentlicht (herausgegeben von T. Leisegang, AIP Conf. Proc. 1765 (2016)). Artikel der ersten beiden Bände zählten mehrfach hintereinander zu den „Most read this month“ der Zeitschrift. Insgesamt sind die Ausgaben bisher mehr als 50 Mal zitiert und über 2000 Mal gelesen worden. Zudem wurde mit den Planungen für die dritte EStorM 2017 begonnen, die vom 12. bis 14. Juni 2017 in Freiberg stattfinden wird (siehe Abbildung 6).

Mit dem zentralen Thema „Energiespeicher“ greift die EStorM ein aktuelles, gesellschaftsrelevantes und für die Energiewende wichtiges Thema auf. Sie



3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL FREIBERG CONFERENCE  
on Electrochemical Storage Materials

Freiberg, from 12<sup>th</sup> to 14<sup>th</sup> June 2017



Abbildung 6: Banner der 3. EStorM-Tagung, die vom 12. bis 14. Juni 2017 in Freiberg stattfinden wird.

richtet sich an Forschungseinrichtungen und Unternehmen sowie an alle diejenigen, die an zukünftigen Lösungen für hoch-energedichte Speicher im Bereich der stationären aber auch mobilen Energiespeicherung mitwirken oder interessiert sind. Die Konferenz trägt zudem zur Sichtbarkeit Freibergs, der Region Mittelsachsens und damit auch Deutschlands als wichtiger Batterieforschungsstandort bei und fördert so die Attraktivität für Investitionen.

Während die erste EStorM alle Komponenten einer Batterie beleuchtete, adressierte die zweite insbesondere Ressourcenaspekte der eingesetzten Materialien, das Batterierecycling und Post-Lithium-Konzepte. Im Rahmen der EStorM 2017 sollen insbesondere Feststoffionenleiter und Feststoffbatterien im Vordergrund stehen, also Themen, die in den letzten Jahren nicht nur am IEP, sondern weltweit stark an Bedeutung gewonnen haben. Methoden zur Charakterisierung von Batteriematerialien, insbesondere *In-situ*- und *Operando*-Methoden, sollen den Abschluss der dreitägigen Veranstaltung bilden. Ausgerichtet wird die Tagung vom Institut für Experimentelle Physik (IEP), unter der Leitung von Prof. Dirk C. Meyer und den Tagungsvorsitzenden Dr. Tilmann Leisegang und Dr. Anastasia Vyalikh.

Der Koordinator des Kompetenzzentrums, Dr. Tilmann Leisegang (siehe Abbildung 7), ist in 2016 zum „Highly Qualified Specialist“ der *Samara State Aerospace University* (jetzt: *Samara National Research University*) in Russland berufen worden (siehe auch Pressemitteilung der TU Bergakade-

mie Freiberg vom 15.03.2016). In diesem Rahmen wurden gemeinsam mit Falk Meutzner eine zweiwöchige Vorlesungsreihe zur Kristallographie von Energiespeichermaterialien am *Samara Center for Theoretical Materials Science* (Direktor: Prof. Vladislav A. Blatov) veranstaltet sowie verschiedene Vorträge zum Thema Energiespeicher präsentiert (siehe Abbildung 8).

Ziel der Zusammenarbeit ist einerseits der Erfahrungsaustausch auf den Gebieten der Kristallographie, der Festelektrolytmaterialien und der elektrochemischen Energiespeicherung und andererseits die Ausarbeitung eines gemeinsamen internationalen Verbundvorhabens unter Leitung der TU Bergakademie Freiberg. Aus der bisherigen Zusammenarbeit sind bisher zwei gemeinsame Publikationen (Meutzner et al., *Chem. Eur. J.* 21 (2015) 16601 und Meutzner et al., *Cryst. Res. Technol.* 52 (2017) 1600223) entstanden.

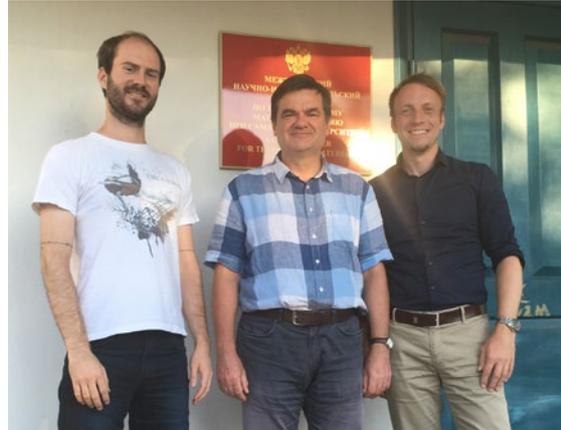
Die *Samara National Research University* ist eine der führenden russischen Universitäten in den Bereichen Raketen- und Raumfahrttechnik, Luftfahrt, Funktechnik, Metallurgie, Automobilbau sowie Informations- und Kommunikationstechnologie. Ihre Geschichte ist eng mit der bemannten Raumfahrt verbunden. So erfolgten Konstruktion und Bau des Raumschiffs des ersten Kosmonauten, Juri Gagarin, in Samara.

Eine besondere Ehrung wurde zurückliegend auch Tina Nestler zuteil, die als *Chairman* für das Sym-



**Abbildung 7:** Dr. Tilmann Leisegang bei Arbeiten an einer Batteriezelle in der Glovebox.

posium „Novel Materials and Devices for Energy Storage: Batteries for Tomorrows World“ auf dem 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Den Haag, Niederlande, 21.–26. August 2016, eingeladen wurde. Zusätzlich war sie bei der Einwerbung eines DAAD IPID4all Young GEOMATENUM International Reisestipendiums für die Teilnahme am International Symposium on Systems with Fast Ionic Transport, Kaunas, Litauen, 3.–7. Juli 2016, erfolgreich. Melanie Nentwich wurde zur Sprecherin des Arbeitskreises „Junge Kristallographen“ der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie (2016–2018) ernannt.



**Abbildung 8:** Falk Meutzner, Prof. Vladislav A. Blatov und Dr. Tilmann Leisegang während ihres Besuchs des Samara Center for Theoretical Materials Science (Russland).

Die finanzielle Unterstützung der Arbeiten des Kompetenzzentrums erfolgte im Rahmen der BMBF-Verbundprojekte CryPhysConcept (03EK3029A) und R2RBattery (03SF0542A), durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, INST267/86-1 FUGG und ME 1433/14-1) und die Sächsische Aufbaubank (SAB) innerhalb der ESF-Nachwuchsforschergruppe PyroConvert (100109976).



# Projekte

## BMBF-Verbundprojekt CryPhysConcept

Klimawandel, globales Bevölkerungswachstum und knapper werdende Ressourcen fordern die Anpassung der globalen sowie lokalen Material- und Energiezyklen. Die Weiterentwicklung der Energiespeicherung ist hierbei ein Schlüssel zur nachhaltigen Energiewirtschaft. 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.

Die elektrochemische Energiespeicherung ist aufgrund ihrer hohen Effizienz geeignet, passende Lösungen zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende zu liefern. Um einer rohstoffbedingten Verknappung und damit einer Erhöhung der Kosten der Energiewende entgegenzuwirken, bedarf es einer gezielten Diversifizierung der Energiespeicherkonzepte sowie von Technologien, die auf ressourceneffizienten und umweltfreundlichen Materialien sowie energieeffizienten Produktionswegen basieren.

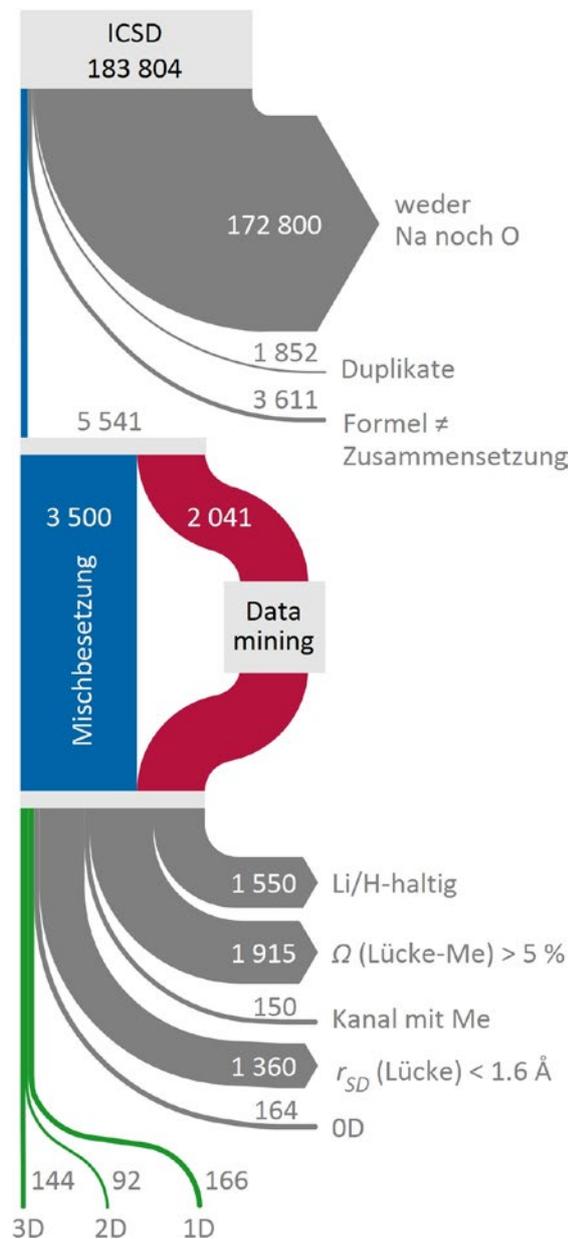
Während die Blei-Säure-Batterie noch immer den größten Anteil an der weltweiten elektrochemisch gespeicherte Energie mit mehr als 93% ausmacht, ihre Technologie ausgereift ist und die Recyclingrate ihrer Komponenten nahezu 100% beträgt, ist Blei dennoch nicht geeignet, um die zu erwartenden Anforderungen für den Ausbau der stationären Energiespeicherlösungen zu erfüllen, da neben den nur moderaten erzielbaren Energiedichten die Selbstentladung hoch ist und die ökonomisch sinnvollen nutzbaren Blei-Reserven den Einsatz auf einer größeren Skala nicht aussichtsreich erscheinen lassen. Darüber hinaus ist Blei hinsichtlich seiner Toxizität ein gemäß den EU- und REACH-Regularien unerwünschtes Element. Stattdessen liegt der Fokus aktueller Forschung und Entwicklung auf der Evolution von Lithium-basierten Systemen, um die Nachfrage zu befriedigen. Betrachtet man die Lithium-Reserven



im Hinblick auf prognostizierte weltweite Bedarfe der angestrebten Elektromobilität, so wird auch hier die Notwendigkeit einer Diversifizierung der Speichertechnologien ersichtlich. Des Weiteren stellt die benötigte hohe gravimetrische Energiedichte immer noch eine kaum überwindbare Hürde für die Lithiumtechnologie dar.

Um für neue Anwendungen und Megatrends die bestmöglichen Speicherkonzepte bereithalten zu können, sind geeignete Energie- und Materialwandlungs- sowie Speicherkonzepte zu identifizieren und für diese neuen Materialien mit geeigneten Eigenschaften unter Berücksichtigung von Ressourcen-, Umwelt-, Recycling- und Sicherheitsaspekten zu entwickeln und zu kombinieren. Hier setzte das BMBF-Verbundprojekt „CryPhysConcept – Mit Kristallphysik zum Zukunftskonzept elektrochemischer Energiespeicher“ an, innerhalb dessen der aktuelle Stand elektrochemischer Energiespeicher evaluiert und die Entwicklung eines Zukunftskonzepts für elektrochemische Energiespeicher und dessen Umsetzung und Heranführung an den Markt geplant wurde. Es war das übergeordnete Ziel des Vorhabens, einen Beitrag zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energieträgern und eine Erweiterung und Verbesserung der grundlegenden Verständnisse zur thermischen, elektrischen und stofflichen Speicherung von Energie zu leisten.

Das Projekt wurde 2016 nach mehr als drei Jahren Laufzeit (01.01.2013 bis 30.04.2016) erfolgreich beendet. Dabei standen unter der Leitung von Prof. Dirk C. Meyer moderne Methoden der kristallphysikalischen Struktur- und Eigenschaftsvorhersage, der Präparation sowie der skalenübergreifenden Analyse im Zentrum der Arbeiten. Diese wurden von der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ unter Leitung von Dr.



**Abbildung 1:** Graphische Darstellung der Datenverarbeitung und Prozessierung sowie Anzahl an potentiellen Kandidaten für Na<sup>+</sup>-Festelektrolyte. Die Zahlen beschreiben die Anzahl an Verbindungen. Siehe hierzu Meutzner et al., *Cryst. Res. Technol.* 52 (2017) 1521.

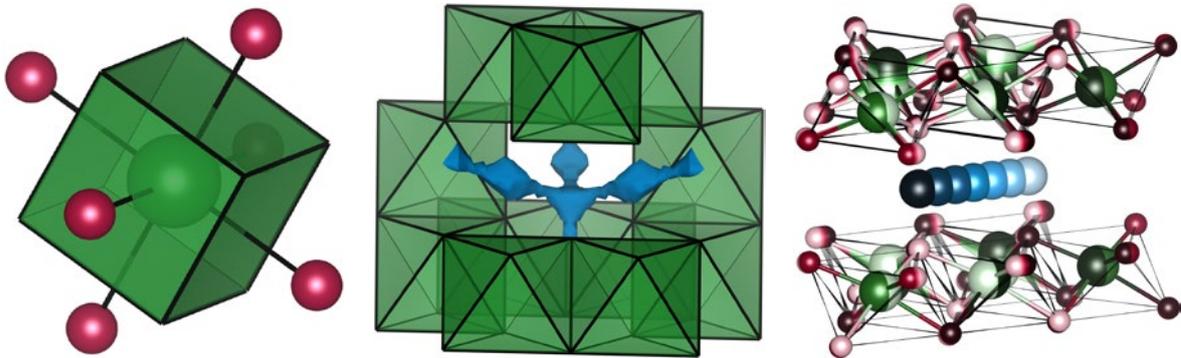
Tilmann Leisegang umgesetzt. Weitere Verbundpartner waren die Arbeitsgruppe „Biominerologie und Extreme Biomimetik“, das Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien (THM) Freiberg, das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Dresden und das Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V., Meinsberg. Die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und

Umwelttechnologien e.V. Dresden-Rossendorf unterstützte das Vorhaben im Unterauftrag.

Zu den Hauptschwerpunkten des Projekts zählten Festelektrolyte für Anwendungen in Feststoffbatterien (hier in Form von *All-in-one*- und Dünnschichtausführungen), das Thema hochvalente Ionen, beispielsweise Aluminiumionen, Si-Anodenmaterialien, modifizierte Oxidelektroden für Metall-Luft-Batterien, Niedertemperatur-Na-S-Batterien und die Anwendung biomimetischer Konzepte. Die Entwicklung und Kombination theoretischer Methoden zur Identifizierung und Bewertung von Materialien während der Projektlaufzeit sollte gleichzeitig die Basis für zukünftige Projekte darstellen. So wurde im Jahr 2016 ein neuer Algorithmus zur Kombination des Voronoi-Dirichlet-Ansatzes mit *Bond-Valence-Site-Energy*-Rechnungen und dichtefunktionaltheoretischer Modellierung zur Identifikation neuer Ionenleiter und Interkalationsmaterialien erarbeitet, u. a. für Al-Ionen. Tina Nestler hielt in diesem Zusammenhang einen Vortrag auf dem Symposium „Novel Materials and Devices for Energy Storage: Batteries for Tomorrow's World“ des 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry in Den Haag, Niederlande (21.–26. August 2016), welches sie gleichzeitig als *Chairman* leitete.

Weitergeführt wurden auch Arbeiten zur Identifizierung von Ionenleitern und Interkalationsmaterialien für Na-Ionen für alle zumindest sauerstoff- und natriumhaltigen Verbindungen der ICSD (siehe Abbildung 1). Eine entsprechende Veröffentlichung erschien in der Fachzeitschrift *Crystal Research & Technology*. Ferner erfolgte die Weiterentwicklung einer Elektrode für eine Metall-Luft-Batterie durch gezielte Modifizierung eines Strontiumtitanat-Einkristalls zur Begünstigung des Ein- und Ausbaus molekularen Luftsauerstoffs.

Wichtige Ergebnisse des Vorhabens, insbesondere des IEP, betreffen die Systematisierung, Kategorisierung und Entwicklung eines Bewertungsalgorithmus für Energiespeichermaterialien sowie eine Strategie zum Auffinden von Festkörperionenleiter- und -interkalationsmaterialien für aussichtsreiche Post-Lithium-Konzepte (siehe Abbildung 2), die Entwicklung



**Abbildung 2:** Graphische Beschreibung der Voronoi-Dirichlet-Zerlegung, bei der senkrechte Ebenen zwischen Atomen konstruiert werden, deren Schnittflächen und -punkte Polyeder bilden (links), der *Bond-Valence-Energy-Landscapes*, bei denen Volumina gewisser Energiewerte berechnet werden, in denen Ionen migrierfähig sind (Mitte) und der Dichtefunktionaltheorie, mit der schrittweise der Diffusionsprozess modelliert werden kann (rechts).

und Patentierung verschiedener Konzepte auf Basis neuer Energie- und Materialwandlungsansätze, u. a. ein neuartiges Silizium-basiertes Elektrodenmaterial, ein *All-solid-state-all-in-one*-Batteriematerial, die Untersuchung von Biomineralien, wie etwa Chitin, zur Verbesserung von elektrochemischen Energiespeichern, das Einbeziehen elektrochemisch aktiver Materialoberflächen sowie Modifizierungsverfahren von Festelektrolytmaterialien und die Schaffung von Ansätzen auf Basis hochvalenter Ionen.

Schließlich erfolgte die Umsetzung eines neuen Ansatzes zur Einbeziehung von thermischer Verlustenergie (Abwärme) für die Nutzbarmachung einer ganz neuen Klasse elektrochemischer Reaktionen an Materialoberflächen und die Vorstellung eines Demonstrators auf der Hannover Messe im April 2016. Letzteres stellte einen weiteren Ausgangspunkt für die Etablierung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten unter Industriebeteiligung dar.

Ferner sollen ressourcenschonende Konzepte auf Basis hochvalenter Ionen, wie beispielsweise Aluminium, sowie auf Basis von Silizium als Anodenmaterial und die Weiterentwicklung neuer Festelektrolytmaterialien für die Niedertemperatur-Natrium-Schwefel-Batterie u. a. in Kooperation mit Industriepartnern in Anschlussvorhaben fortgeführt und weiter ausgearbeitet werden (siehe Abbildung 3). Der Bewertungsalgorithmus soll ebenso Gegenstand eines weiteren Vorhabens im Zusammenhang mit Recycling von kritischen Elementen werden.

Zur Diskussion oben genannter Themen und damit verbundener Fragestellungen wurde im Rahmen des Projekts die *International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials (EStorM)* etabliert und im zweijährigen Turnus abgehalten. Deren Ergebnisse sind in zwei Proceedings-Bänden festgehalten. Im August 2016 erschien der zweite Band „*Electrochemical Storage Materials: Supply, Processing, Recycling and Modelling*“ im AIP Publishing Verlag (siehe Abbildung 4).

Der Ausbau der internationalen Vernetzung wurde, neben der EStorM, durch Auslandsaufenthalte von Projektmitarbeitern u. a. mit zusätzlich eingeworbenen Mitteln sowie durch weitere Vernetzungsaktivitäten vorangetrieben. Zum engeren Kreis dieser Partner zählen:

- *Bar-Ilan University*, Gruppe Prof. D. Aurbach, Ramat Gan, Israel,
- *Samara National Research University, Center for Theoretical Materials Science*, Gruppe Prof. V. A. Blatov, Samara, Russland,
- *Lomonosov Moscow State University*, Gruppe Prof. E. V. Antipov, D. M. Itkis, Moskau, Russland,
- *National University of Science and Technology – MISIS*, Moskau, Russland,
- *National University of Singapore, Department of Materials Science and Engineering*, Gruppe Prof. S. Adams.

Weitere wichtige Aktivitäten im Zusammenhang betrafen den Forschungsaufenthalt von Falk Meutzner



Abbildung 3: Testzelle vor elektrochemischem Messaufbau.

und Tilmann Leisegang an der *Samara National Research University* (Samara, Russland). Dort gaben sie einen Kristallographiekurs mit dem Thema „An introduction to crystallography – through the diverse world of crystalline matter towards solid electrolytes“. Neben Grundlagen zur Kristallographie und Elektrochemie wurde auch das Thema Ressourcen mit einbezogen. Der Aufenthalt wurde ebenso genutzt, um die gemeinsamen Arbeiten zur Identifizierung von Ionenleitermaterialien weiter auszubauen.

Die nationale Vernetzung erfolgte u. a. durch das 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.

Am Ende des Projekts sind 7 Patente angemeldet, 43 Veröffentlichungen publiziert, 66 Konferenzbeiträge erstellt und 12 Graduierungs- und studentische Arbeiten angefertigt worden. Zudem wurden zahlreiche Vorträge auf Fachkonferenzen und Seminaren gehalten, mehr als 10 Preise, Ehrungen und Auszeichnungen für die Arbeiten in diesem Projekt erhalten und diverse Beiträge in Funk-, Fernseh- und Printmedien öffentlichkeitswirksam platziert.



Abbildung 4: Cover der Proceedingsbände zu den EStorM-Konferenzen 2013 und 2015.

Wir danken dem Projektträger, insbesondere Frau Kerstin Annassi und ihrem Team, für die umfassende, reibungslose und stets freundliche Unterstützung sowie für die zielführenden Hinweise und Kommentare, ganz besonders auch für fachliche Impulse während der gesamten Projektlaufzeit. Ein weiterer Dank gilt allen Verbundpartnern für die fruchtbare, zielführende und erfolgreiche Zusammenarbeit. Ein ganz besonderer Dank gilt allen Unterstützern, die durch ihre Beiträge die Arbeiten des Vorhabens bereichert haben, wobei besonders Prof. Vladislav A. Blatov (Samara, Russland), Prof. D. Aurbach (Ramat Gan, Israel), Prof. Evgeny V. Antipov (Moskau, Russland), Dr. Martin Schuster (Litarion GmbH, Kamenz), Frank Treffer (Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang) und Dr. Hubertus Bardt (Institut der Deutschen Wirtschaft, Köln) hervorzuheben sind. Wir danken ebenfalls der Verwaltung der TU Bergakademie Freiberg, allen Kollegen des Instituts für Experimentelle Physik, besonders Dr. Claudia Funke und Dr. Hartmut Stöcker, sowie allen nicht namentlich genannten Persönlichkeiten. Für die Finanzierung danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Projektnummer 03EK3029A).

**ENERGIE SPEICHER**  
Forschungsinitiative der Bundesregierung



## BMBF-Verbundprojekt R2RBattery

Die weltweite Nachfrage nach Energiespeichern steigt mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und der wachsenden Anzahl an Elektrofahrzeugen und mobilen Endgeräten. Um den zukünftigen Bedarf decken sowie den stetig steigenden Anforderungen gerecht werden zu können, sind neue Speichertechnologien und Materialsysteme mit höchsten Energiedichten und gut verfügbaren Rohstoffen erforderlich. Das IEP entwickelt dafür im Verbundprojekt R2RBattery neuartige Post-Lithium-Energiespeicher.

Im Jahr 2015 wurden weltweit etwa 425 GWh an wiederaufladbaren elektrochemischen Zellen produziert. Eine jährliche Wachstumsrate von etwa 12% wird erwartet. Aktuell und mittelfristig wird neben der Blei-Säure-Technologie für den Einsatz als Starterbatterie die Lithium-Ionen-Technologie aufgrund ihres ausgereiften Stands den Markt der Sekundärspeicher dominieren. Überwiegend große japanische (z. B. Sony, Toshiba, Panasonic) oder koreanische (z. B. Samsung) Elektronikunternehmen treiben diese Technologie voran, was auch die exponentiell steigende Zahl von Patenten wiedergibt. Deutsche Unternehmen hingegen finden sich nicht unter den Top 10 der Patentanmelder. Dies langfristig zu ändern erscheint durch neue, insbesondere Post-Lithium-Ansätze, möglich. Um konkurrenzfähig zu sein, müssen daher von Anfang an neue Wege im Fertigungsprozess beschritten und bei der Materialevaluierung einbezogen werden.

Zieht man die gesamten weltweit verfügbaren Ressourcen und die zurzeit noch nicht wirtschaftlich nutzbaren Reserven von Lithium heran (ca. 14 Mio. t), so würden diese nach aktuellem Stand für ca. 1 Mrd. PKW (mit jeweils ca. 500 km Reichweite) reichen, was dem heute bereits vorhandenem weltweiten Bestand entspricht. Diese Zahl veranschaulicht, dass die Umsetzung der Energiewende, die elektrochemische Energiespeicher nicht nur für die Elektromobilität, sondern auch für stationäre Anwendungen benötigt, allein mit der Lithium-Ionen-Technologie kaum möglich ist. Deshalb werden zusätzliche alternative Materialsysteme für eine Technologie-



Diversifizierung benötigt, auch um Deutschland im Bereich der Energiespeicher wettbewerbsfähig zu halten.

Doch welche Materialien erscheinen sinnvoll? Insgesamt sind weltweit ausreichend Metalle und Rohstoffe vorhanden. Entscheidend für deren Nutzung ist jedoch, wie sich die Rohstoffpreise entwickeln und wie zugänglich die Märkte sind. Die Auswahl und Bewertung geeigneter Materialien wurden zurückliegend mit einem in Freiberg entwickelten Bewertungsalgorithmus, der auf einem ausgedehnten Parameterfeld basiert, durchgeführt und Teile davon bereits publiziert. Die Bewertungskriterien schließen, neben elektrochemischen Parametern, Ressourcenverfügbarkeit, Umweltverträglichkeit, Recycling, Materialkosten und Betriebssicherheit ein. Demgemäß erscheint das Konzept einer wiederaufladbaren Hochvalent-Ionen-Festkörperbatterie auf Aluminium-Basis als aussichtsreich. Hierbei dient reines Aluminium als Anodenmaterial. Das bietet einerseits den Vorteil einer viermal höheren theoretischen Ladungsdichte im Vergleich zu Lithium. Bei gleichem Volumen der Al-Ionen-Batterien würde ein Auto potentiell die zwei bis sechsfache Reichweite im Vergleich zu kommerziellen Lithium-Ionen-Batterien aufweisen. Andererseits ist Aluminium das häufigste Metall der Erdkruste. Es existiert eine ausgereifte Produktionsindustrie und Recyclinginfrastruktur, sodass Aluminium folglich kostengünstig ist. Es ist ein Kostensenkungspotential gegenüber kommerziellen Lithium-Systemen um ein Fünftel bezogen auf den Preis pro Kilowattstunde zu erwarten. Darüber hinaus entzündet sich Aluminium nicht wie Lithium an Luft, wodurch eine höhere Sicherheit entsprechender Zellen und vereinfachte Verarbeitbar-

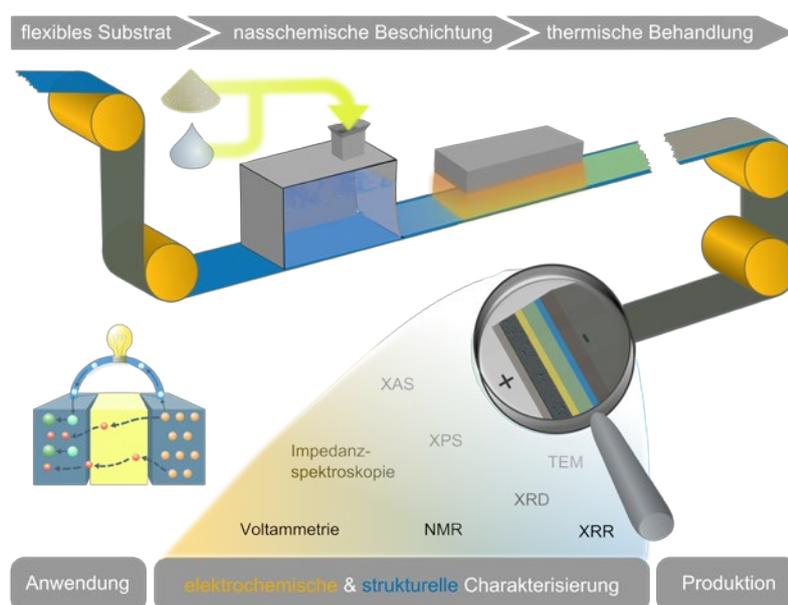
keit gewährleistet werden kann. Damit könnten die Aluminium-Ionen-Batterien einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten.

Bisher war es nicht möglich, dieses technologische Potential zu nutzen, da geeignete Kathoden- und Elektrolytmaterialien fehlten. Das Auffinden von anorganischen Materialien mit hoher Aluminium-Ionen-Mobilität – einsetzbar als Festelektrolyte oder Interkalationskathoden – könnte einen Innovationsprung im Bereich der wiederaufladbaren Hochvalente-Ionen-Batterien ermöglichen. Hier setzt das neue Verbundvorhaben „Maßgeschneiderte Materialsysteme und Technologien für die Rolle-zu-Rolle-Fertigung elektrochemischer Energiespeicher auf flexiblen Trägern – Hochvalente Ionen für die Energiewende (R2RBattery)“ an (siehe Abbildung 1).

Ziel von R2RBattery ist es, ein Post-Lithium-Energiespeichersystem auf Basis hochvalenter Ionen in Kooperation mit lokalen Industrie- und Forschungspartnern zu entwickeln und maßgeschneiderte Lösungen für deren potentielle großtechnische Produktion zu erarbeiten. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt arbeiten innerhalb der nächsten drei Jahre insgesamt vier Verbundpartner (Kurt-Schwa-

be-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg, Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden, Vowalon GmbH Treuen) unter Leitung der TU Bergakademie Freiberg (Koordinator: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Projektmanager: Dr. Tilmann Leisegang) an der Umsetzung dieser neuen Post-Lithium-Ansätze für die elektrochemische Energiespeicherung. Weitere Partner sind das Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen Freiberg, die Von Ardenne GmbH Dresden, die Frolyt Kondensatoren und Bauelemente GmbH Freiberg, die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien, Radeberg, und die Cinector GmbH Mittweida. Ein wichtiger Meilenstein wird die gemeinsam geplante und in der Zeit vom 12. bis 14. Juni 2017 stattfindende 3<sup>rd</sup> International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials (EStorM) darstellen.

Im Rahmen der Vorarbeiten zum Projekt wurde Tina Nestler als *Chairman* für das Symposium „Novel Materials and Devices for Energy Storage: Batteries for Tomorrow's World“ auf dem „67<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry“, Den Haag, Niederlande (21.–26. August 2016) eingeladen. Weiterhin erfolgt der Ausbau der internationalen Vernetzung mit der Arbeitsgruppe



**Abbildung 1:** Schema zur Batterieherstellung innerhalb des Projekts R2RBattery im Rolle-zu-Rolle-Prozess inklusive der anschließenden Methoden zur Charakterisierung.

von Prof. Doron Aurbach, an der *Bar-Ilan University, Department of Chemistry, Ramat Gan, Israel*. Durch ein Federmann-Stipendium gefördert, wird Tina Weigel in der Zeit von Januar bis Juni 2017 in der Arbeitsgruppe Aurbach einen *In-situ-/Operando*-Röntgendiffraktometriemessplatz für die Charakterisierung elektrochemischer Zellen aufbauen.

Das Vorhaben R2RBattery stellt gleichzeitig einen wichtigen Meilenstein im Hinblick auf die Forschungsarbeiten des in Freiberg im Aufbau befindlichen Zentrums für effiziente Hochtemperaturstoffwandlung (ZeHS) dar, da das Speichern von Energie eines der Themen ist, die im Zusammenhang mit der Nutzung elektrischen Stroms für Hochtemperaturprozesse eine wichtige Rolle einnehmen.

Das Verbundvorhaben wird mit Mitteln des BMBF innerhalb der Maßnahme „Materialforschung für die Energiewende“ (Förderkennzeichen: 03SF0542A) gefördert und vom Projektträger Jülich betreut.



Abbildung 2: Knopfzelle vor einfachem Strukturmodell.

## BMBF-Verbundprojekt SyNeSteSia

Das deutsch-russische Forschungsprojekt SyNeSteSia (engl. „Synchrotron and Neutron Studies for Energy Storage“) beschäftigt sich mit elektrochemischen Prozessen an Grenzschichten innerhalb elektrochemischer Energiespeicher. Zur Untersuchung dieser Prozesse kommen in SyNeSteSia überwiegend Synchrotron- und Neutronen-basierte sowie *Operando*-Methoden zum Einsatz.

Als Ergebnis der Forschungsarbeiten in SyNeSteSia sollen neuartige *Operando*-Charakterisierungsmethoden entwickelt und getestet werden, um einen Beitrag zur Aufklärung von elektrochemischen Vorgängen sowie Strukturveränderungen an elektrochemischen Grenzflächen zu leisten. Das Erreichen dieser herausfordernden Aufgaben wird insbesondere durch die sich ergänzenden Expertisen und Methoden der einzelnen Projektpartner und durch deren intensive Kooperation ermöglicht.

Am Verbundprojekt, das vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung 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 in Mülheim an der Ruhr, 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 vom Institut für Experimentelle Physik (IEP) koordiniert.

Innerhalb des Projekts fokussiert sich das IEP wissenschaftlich auf *Operando*-Struktur- und Dynamikuntersuchungen mittels der nuklearen Magnetresonanz (NMR). Diese Methodik wird ergänzt durch *Ex-situ*-Untersuchungen mittels der elektrochemischen Impedanz-Spektroskopie, der „klassischen“ NMR sowie der Elektronenspinresonanzspektroskopie. Wie im gesamten Projekt stehen hierbei die elektrochemischen Vorgänge sowie strukturellen Veränderungen an elektrochemischen Grenzflächen innerhalb funktionstüchtiger elektrochemischer Energiespeicher und -wandler im Mittelpunkt des Interesses (siehe Abbildung 1).

Damit fügt sich das Projekt konsequent in die Forschungsaktivitäten des IEP zu Energiespeichern ein und ergänzt diese um wichtige Methoden und Materialien, die für das Verständnis, die Erforschung und die Weiterentwicklung von Energiespeichern und -wandlern förderlich sind.

Im Rahmen der bisherigen spezifischen Aktivitäten des IEP im Projekt konnte ein *In-situ*- und *Operando*-NMR-Messaufbau entwickelt werden, inklusive des Designs der zugehörigen elektrochemischen Zellen gemäß der spezifischen Anforderung der NMR. Die Funktionstüchtigkeit des Messaufbaus, der zugehörigen elektrochemischen Zellen, deren hohe Variabilität sowie die hohe Relevanz der erzielten Ergebnisse für die zukünftige Forschung zu Energiespeichern und -wandlern konnten u. a. anhand von Li-Ionen-Batterien nachgewiesen werden.

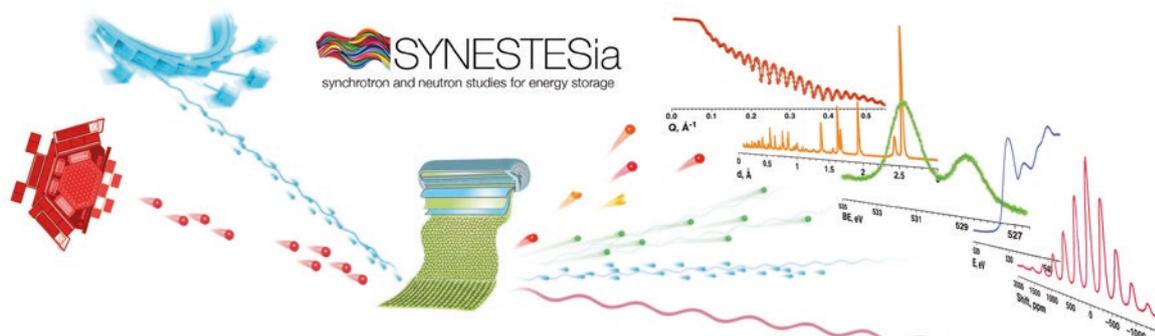


Abbildung 1: Graphische Darstellung der Methoden innerhalb des Projekts SyNeSteSia.

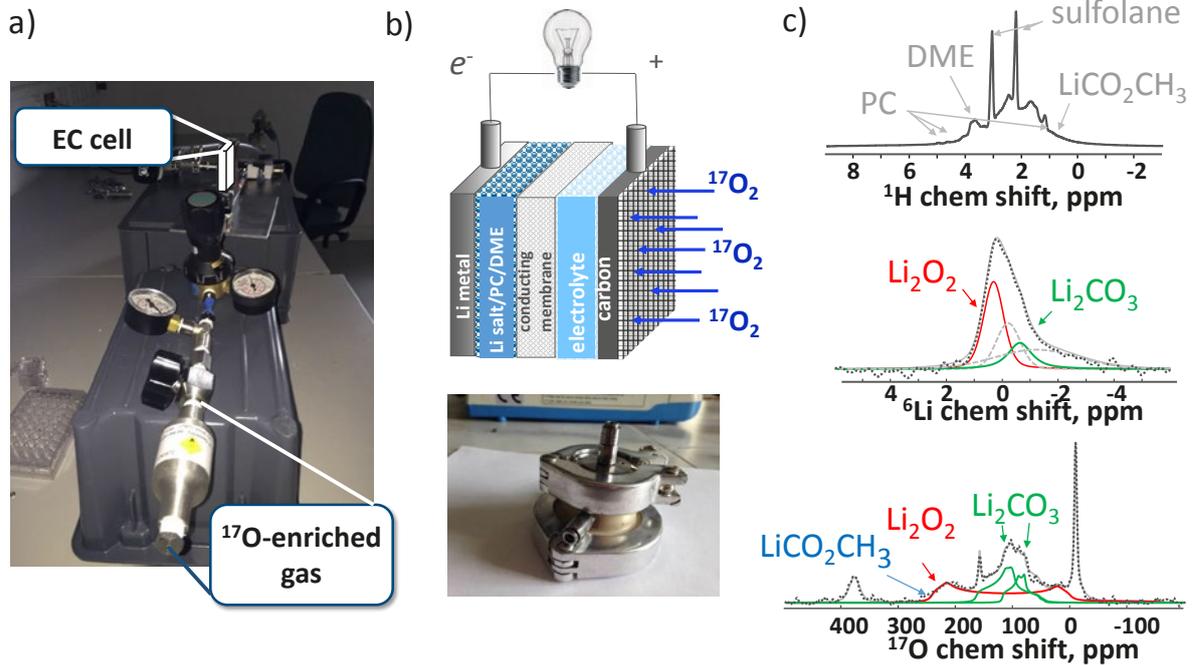


Abbildung 2: a) Experimenteller Aufbau zur  $^{17}\text{O}$ -Anreicherung, b) Aufbau der elektrochemischen Zelle und c) Ex-situ-NMR-Spektren.

Zudem wurde mit den Projektpartnern erfolgreich daran gearbeitet, die Nachweisempfindlichkeit der NMR bezüglich relevanter Materialien durch Isotopen-Anreicherung signifikant zu erhöhen, z. B. durch die Erhöhung des  $^{13}\text{C}$ -Gehalts von Interkalationskathoden oder des  $^{17}\text{O}$ -Gehalts in Lithium-Luft-Batterien (siehe Abbildung 2). Diese Anreicherung ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Änderung der Kohlenstoffbestandteile in elektrochemischen Zellen, wie z. B. in Interkalationskathoden *operando*, aber auch *ex situ*, mittels der NMR messen zu können, da lediglich diese Isotope zum NMR-Messsignal beitragen.

Teilergebnisse des Projektes konnten bisher in vier wissenschaftlichen Artikeln publiziert und auf mehreren Fachtagungen präsentiert werden. Des Weiteren

ist es durch die Vorarbeiten in SyNeSteSia gelungen, zusammen mit den *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry* ein Projekt im Rahmen des Alumni-Programms der Alexander von Humboldt-Stiftung zum Thema „Development of phosphorus-carbon nanotube material for energy storage devices“ (PhosCar) zu etablieren, das im Jahr 2017 startet und die gemeinsamen Aktivitäten weiter stärken wird.

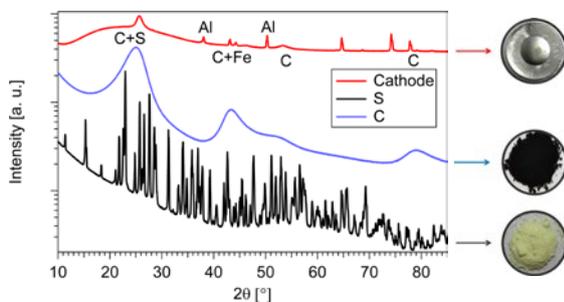
Für die Finanzierung danken wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 05K14OFA).



## BMWi-Verbundprojekt BaSta

Die Umstellung der Antriebstechnologien im Automobilbereich sowie die eingeleitete Energiewende und der damit verbundene notwendige Ausbau dezentraler stationärer Anwendungen im Zusammenhang mit regenerativer Stromerzeugung bedingen, dass elektrochemische Energiespeicher zunehmend an Bedeutung gewinnen – in letzterem Fall insbesondere auch für die Gewährleistung der Netzstabilität. Hierbei müssen Forderungen der Gesellschaft und Industrie nach immer kostengünstigeren, leistungsfähigeren und betriebssicheren mobilen und stationären Energiespeichern berücksichtigt werden.

Der Fokus aktueller Forschung und Entwicklung liegt auf der Evolution von Lithium-basierten Systemen, um die Nachfrage zu befriedigen. Betrachtet man die Lithium-Reserven im Hinblick auf prognostizierte weltweite Bedarfe, so wird auch hier die Notwendigkeit einer Diversifizierung der Speichertechnologien ersichtlich. Im besonderen Maße gilt dies



**Abbildung 1:** Röntgenpulverdiffraktogramme der Kathodenseite und der Ausgangssubstanzen Schwefel (S) und Carbon Black (C) sowie Fotografien der eingesetzten Materialien (oben) und Operando-Zelle während der Messung (unten).



für Dimensionierungen im Megawattbereich, für die erhebliche Investitionskosten anfallen, die wiederum auf den Endverbraucher und die Industrie, umgelegt werden. Zusätzlich darf auch die Rohstoffverknappung und damit die erhebliche Preissteigerung weiterer Materialien wie beispielsweise Nickel und Kobalt nicht vernachlässigt werden.

Um für neue Anwendungen und Megatrends die bestmöglichen Speicherkonzepte bereithalten zu können, sind geeignete Energiewandlungs- sowie Speicherkonzepte erforderlich, welche wiederum neue Materialien mit geeigneten Eigenschaften unter Berücksichtigung von Ressourcen-, Umwelt-, Recycling- und Sicherheitsaspekten benötigen. Hier setzte das Verbundprojekt „Batterie Stationär in Sachsen (BaSta)“ an, in dem sich ein Forschungskonsortium, bestehend aus renommierten Universitäten und Forschungseinrichtungen des Freistaats Sachsen, zusammengetan hat, um die jeweiligen, unterschiedlichen Kompetenzen zur Entwicklung eines neuen Batterietyps für stationäre Anwendungen zu bündeln. Der innovative Ansatz des Projekts bestand in der Entwicklung eines neuen elektrochemischen Energiespeichers auf Basis der Natrium-Schwefel-Technologie.

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

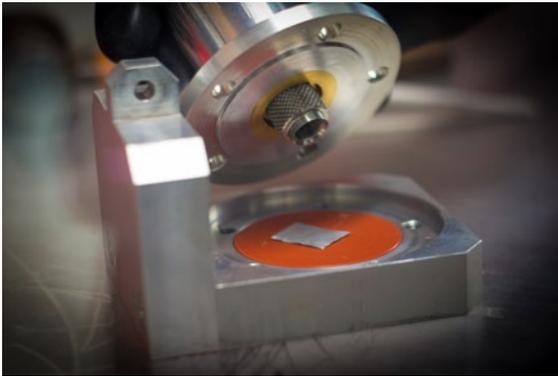


Abbildung 2: Ausstanzen des Elektrodenmaterials.

ressourcenschonende Alternative zur etablierten Lithium-Ionen-Technologien, insbesondere für stationäre Anwendungen, dar.

Für elektrochemische Energiespeicheranwendungen im Megawattbereich besitzt die 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  $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$  ( $\beta$ -Aluminiumoxid) möglich, welches eine hohe Leitfähigkeit für Natriumionen bei Betriebstemperaturen von über  $300^\circ\text{C}$  aufweist. Diese wurde von Ford für Elektrofahrzeuge in den 1990er Jahren verwendet. *NGK Insulators Ltd.* aus Japan entwickelte auf  $\beta$ -Aluminiumoxid basierende keramische Festelektrolyte und verbesserte so das Na-S-Konzept. 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, welche 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.  $350^\circ\text{C}$



Abbildung 3: Präparierte Knopfzelle.

benötigten Heizenergie zu einer Verringerung der Gesamteffizienz. Des Weiteren bedingt die Verwendung von flüssigem Natrium hohe Sicherheitsanforderungen und damit erhöhte Kosten.

Zur Überwindung der Nachteile der Hochtemperatur-Na-S-Technologie wurde im Verbundprojekt BaSta, an der Entwicklung einer Niedertemperaturvariante des Na-S-Akkumulators gearbeitet, der die Vorteile bekannter Na-S-Zellen aufweist und den größten Nachteil, durch ein neues Niedertemperaturkonzept, umgeht. BaSta wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und durch das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) in Dresden koordiniert. Auf Freiburger Seite koordinierten Dr. Tilmann Leisegang und Dr. Wolfram Münchgesang die Arbeiten. Im Rahmen des Teilprojekts „Multiskalen-Betrachtung für ressourceneffiziente Materialkonzepte“ arbeitete 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-Eigenschafts-Beziehungen. Dementsprechend standen der Zusammenhang zwischen Kristallstruktur bzw. Gefüge und lokaler bzw. globaler Ionenleitfähigkeit im Mittelpunkt der experimentellen und theoretischen Arbeiten des IEP. Das BaSta-Teilprojekt fügte sich damit in die langfristig angelegten Aktivitäten des IEP zu elektrochemischen Energiespeichern ein.

Es war das übergeordnete Ziel des Vorhabens, einen Beitrag zur verstärkten Nutzung von erneuer-

baren Energieträgern sowie eine Erweiterung und Verbesserung des grundlegenden Verständnisses zur elektrochemischen Speicherung von Energie zu leisten. So stand das Verständnis der festkörperphysikalischen und -chemischen Prozesse, welche die Funktionsweise und die Alterung eines elektrochemischen Energiespeichers bestimmen, im Zentrum der Arbeiten. Insbesondere mussten 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
- Aufklärung und konstruktive Vermeidung von Degradationsmechanismen.

Im zurückliegenden Zeitraum konzentrierten sich die Forschungsaktivitäten daher auf Festelektrolyte aus dem glaskeramischen  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ -System (NYS), die am Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS) in Dresden hergestellt wurden. Hierbei erfolgten insbesondere Untersuchungen zu Ionenmigrationspfaden, der Mobilität der mobilen Spezies  $\text{Na}^+$  und der kristallographischen Phasenzusammensetzung. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden von den Projektpartnern genutzt, um die Herstellungstechnologien auf die Zielparаметer einstellen zu können. Weiterhin wurden die Phasenstabilität und die Eignung von vielversprechenden neuen Anoden- und Festelektrolytmaterialien untersucht und bewertet.

Erreicht wurden die Projektziele durch einen methodischen Ansatz, der kristallographische und festkörperphysikalische Methoden in Charakterisierung und Modellierung einbezog, ausgehend von der kristallinen Ordnung auf atomarer Skala über die Betrachtung der Phasenstabilität, der Grenzflächenreaktionen der Individuen des Gefüges auf mikroskopischer Skala bis hin zum makroskopischen Gesamtsystem der für die Funktion elektrochemischer Energiespeicher relevanten Längen- und Zeitskalen.

Im Verlauf der Projektbearbeitung erfolgte gemeinsam mit dem Projekt CryPhysConcept die Etablierung der *International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials* (EStoM). Weitere wichtige Ergebnisse des Vorhabens waren die Identifizierung von neuartigen Festkörperionenleiter- und -interkalationsmaterialien für Na-Ionen und die Veröffentlichung dieser Ergebnisse, die Aufklärung von Mikrostrukturdefekten der genutzten Materialien und Materialkombinationen sowie insgesamt Beiträge zur Verbesserung des Verständnisses dieser Materialien und der elektrochemischen Energiespeicherung. Am Ende des Projekts sind 6 Veröffentlichungen publiziert, 16 Konferenzbeiträge erstellt und eine Graduierungsarbeit angefertigt sowie diverse Vorträge und Beiträge im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt worden. Ein Anschlussvorhaben ist in Planung.

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (0325563D) für die finanzielle Unterstützung des Projekts und dem Projektträger Jülich, insbesondere Herrn Dr. Aleksander Rakic, für die Betreuung des Teilvorhabens, die reibungslose Zusammenarbeit und stete Hilfsbereitschaft.



## Freiberger Zentrum für Pyroelektrizität

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 nunmehr von Dr. Hartmut Stöcker geleitete „Freiberger Zentrum für Pyroelektrizität“ (FZP) 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 Abbildung 1).

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

- 2007: Pyroelektrische Röntgenstrahlerzeugung mit Lithiumniobat (siehe Abbildung 2).
- 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: Nachweis der desinfizierenden Wirkung pyroelektrischer Oberflächen.
- 2010: Nachweis der eisabweisenden Wirkung pyroelektrischer Oberflächen.
- 2010: 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 eisabweisender Oberflächenbeschichtungen auf der Basis pyroelektrischer Materialien.

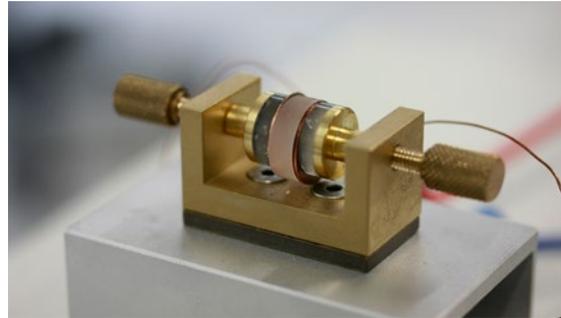


**Abbildung 1:** Glieder der Innovationskette, entlang derer spezifische Kompetenzen aufgebaut wurden und die mit dem „Freiberger Zentrum für Pyroelektrizität“ institutionalisiert werden.

- 2013–2014: Bau eines Demonstrators zur Wasserstoffherzeugung 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.
- 2016: UHV-Vakuumkammer zur Bestimmung pyroelektrischer Koeffizienten bei hohen Temperaturen bis 1000 °C.

## Demonstrator zur pyroelektrischen Wasserstoffherzeugung

Zur Umwandlung von Niedertemperaturabwärme in chemische Energie wurde am IEP ein Demonstrator zur pyroelektrischen Wasserstoffherzeugung entwickelt und in Betrieb genommen (siehe Abbildung 3). Dieser wurde erstmals öffentlich auf der Hannover Messe 2016 am Gemeinschaftsstand „Forschung für die Zukunft“ der Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen präsentiert (siehe Abbildung 4). Unter dem Titel „Niedertemperaturabwärme nutzen – Mit Pyroelektrizität zu neuen Energiekonzepten“ stellte das Institut seine Forschungsergebnisse und Patentanmeldungen vor (siehe auch Pressemitteilung der TU Bergakademie Freiberg vom 02.03.2016). Während der vier Tage (25.–28. April) besuchten etwa 300 Personen den Stand des IEP, der von Dr. Tilmann Leisegang, Dr. Mateo Urena de Vivanco, Marco Herrmann und Robert Schmid betreut wurde. Unter den Gästen war u. a. der Sächsische Wirtschaftsminister, Martin Dulig, der sich über die neusten Forschungsentwicklungen der sächsischen Hochschulen insgesamt informierte. Einer der Besucher vertrat die *GE Global Research*. Mit *GE Global Research* wurde im Anschluss ein gemeinsames, sechsmonatiges Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gestartet. In diesem wird auf die Bewertung von Pyroelektrika für ihren Einsatz zur pyroelektrischen Wasserstoffherzeugung gezielt.



**Abbildung 2:** Pyroelektrischer  $\text{LiNbO}_3$ -Kristall in einer Halterung zum Abgriff der Oberflächenladungen, die in Folge einer Temperaturänderung entstehen.

Die Pyroelektrizität ist eine kristallphysikalische Eigenschaft, die ausschließlich bei Materialien auftritt, die ein permanentes elektrisches Dipolmoment besitzen (wie z. B. Bariumtitanat). Durch eine zeitliche Temperaturänderung des Kristalls, beispielsweise durch zugeführte Abwärme, kommt es zu einer Ladungstrennung. Dabei entstehen auf den gegenüberliegenden Flächen des Kristalls unterschiedliche Potentiale und damit eine abgreifbare elektrische Spannung. Genutzt wird dies beispielsweise zur berührungslosen Temperaturmessung bei Infrarotthermometern oder zur Bewegungserkennung, also der Detektion der Wärmestrahlung von sich bewegenden Objekten oder Personen. Im Demonstrator kommen pyroelektrische Materialien nunmehr zum Einsatz, um mittels Niedertemperaturabwärme Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten.

Im Demonstrator wird die von außen zugeführte Abwärme zunächst durch einen Wärmeübertrager in einen Sekundärkreislauf überführt. Das darin zirkulierende Medium (z. B. Wasser) wird durch einen Reaktor geleitet, in dem sich das pyroelektrische Material befindet. Durch den zyklischen Wechsel von kaltem und warmem Zustrom wird das pyroelektrische Material aktiv und die Moleküle des Wassers reagieren an dessen Oberfläche. Sie werden dort in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Die gelösten Gase werden vom Medium abgeführt und schließlich durch eine Membran abgetrennt und danach für die weitere Verwendung gespeichert. Mittels des pyroelektrischen Effekts lässt sich folglich bisher ungenutzte Abwärme (thermische Energie) in elektrische bzw. chemische Energie wandeln.

Dies ist insbesondere im Hinblick auf die weltweiten Energiewende-Aktivitäten von Bedeutung und dementsprechend für das in den zurückliegenden Jahren ab 2012 deutlich gestiegene Interesse an Pyroelektrika.

Genutzt werden kann das System dort, wo Abwärme mit Temperaturen von weniger als 120°C (aber auch darüber) anfällt, wie dies bei zahlreichen Industrieprozessen vorkommt. Oftmals bleibt diese Abwärme ungenutzt, da geeignete effiziente Wandlungsverfahren fehlen. Eine Nutzung selbiger zur Erzeugung von Wasserstoff wäre somit ein Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz. Daher ist es das Ziel des IEP, diese erheblichen Mengen ungenutzter Niedertemperaturabwärme künftig sinnvoll nutzbar zu machen.

Wasserstoff wird heute in vielen Industriezweigen genutzt sowie insbesondere in Brennstoffzellen verstromt. Der große Nachteil dieses Energieträgers ist, dass die herkömmliche Synthese von Wasserstoff, die Elektrolyse, sehr energieaufwendig und kostenintensiv ist. Dabei muss für die Spaltung und die anschließende Vermeidung einer Rückreaktion der Moleküle eine große (elektrische) Energiemenge aufgewendet werden. Um den Wasserstoff kostengünstiger bereitzustellen, wird am IEP gemeinsam mit Industriepartnern daran gearbeitet, die pyroelektrische Wasserstoffherzeugung in ein wirtschaftlich tragfähiges Verfahren zu überführen.



**Abbildung 3:** Demonstrator zur pyroelektrischen Wasserstoffherzeugung mit drei Zylindern zur Aufnahme des Aktivmaterials.

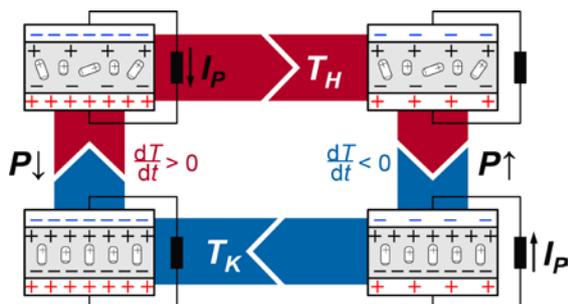


**Abbildung 4:** Präsentation des Demonstrators zur pyroelektrischen Wasserstoffherzeugung auf der Hannover Messe 2016.

## Nutzung von Abwärme zur Erzeugung von Wasserstoff und Elektrizität mit pyroelektrischen Oxiden

Das Forschungsvorhaben „Nutzung von Abwärme zur Erzeugung von Wasserstoff und Elektrizität mit pyroelektrischen Oxiden“ wird im Rahmen einer Initiative des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr gefördert. Ziele sind insbesondere die Steigerung der Energieeffizienz und die Erforschung innovativer Energietechniken. Das Vorhaben ist verknüpft mit den Projekten „Entwicklung innovativer Materialsysteme für die bidirektionale elektrochemische Wasserstoff-Strom-Transformation“, welches am KSI Meinsberg bearbeitet wird, und „Katalysator und Reaktorentwicklung für die selektive chemische Synthese von Olefinen mit regenerativ erzeugten  $H_2$  und  $CO_2$ “, erforscht durch das Fraunhofer IKTS in Dresden. Das breite thematische Spektrum erlaubt es, ganz neue Methoden und Ansätze zu kombinieren, was neben den Berichten zu den erzielten Fortschritten ein weiteres Thema der halbjährlich stattfindenden Doktorandentreffen ist. Am Institut für Experimentelle Physik forschen derzeit zwei Doktoranden unter der Leitung von Dr. Hartmut Stöcker an pyroelektrischen Funktionsmaterialien, die zum einen in elektrischen Kreisprozessen und zum anderen auf ihre katalytische Wirksamkeit, am Beispiel der Wasserelektrolyse, getestet werden.

Gängige Verfahren zur Umwandlung von Restwärme in elektrische Energie, wie der organische Rankine-Zyklus oder thermoelektrische Generatoren,

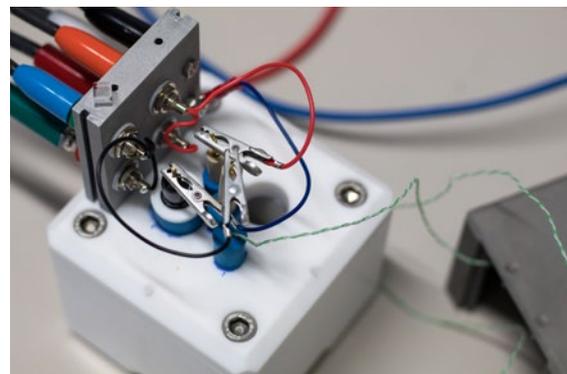


**Abbildung 1:** Schematische Darstellung eines pyroelektrischen Kreisprozesses.

haben je nach Anwendungsgebiet merkliche Nachteile. Im Projekt gilt es nun, die elektrischen Kreisprozesse auf Basis von Pyroelektrika zu untersuchen (siehe Abbildung 1). Darunter fallen die Olsen-, Stirling- oder Lenoir-Zyklen, die in der wissenschaftlichen Literatur bereits länger bekannt sind, deren Potential in der Technik aber noch nicht in größerer Breite erschlossen ist. Ziel des Vorhabens ist die Evaluierung und Weiterentwicklung der bekannten elektrischen Kreisprozesse, um Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit zu verbessern und eine technische Umsetzung vorzubereiten.

Auf chemischer Seite sind prinzipiell verschiedene Redoxprozesse durch Pyroelektrika aktivierbar, wobei hier die Wasserspaltung im Vordergrund stehen soll. Die an der Oberfläche des pyroelektrischen Aktivmaterials ablaufenden Ladungs- und Stofftransfers sind gegenwärtig unzureichend untersucht. Ein besseres Verständnis der Redoxaktivität der Oberfläche soll im Vorhaben erarbeitet werden, um die produzierbare Menge an Wasserstoff voraussagen und steigern zu können. Mit dieser Voraussetzung für die Optimierung von Material und Verfahren wird somit auch die Grundlage für den Transfer und Einsatz auf der Industriekala gelegt.

Im November des Jahres 2016 fand die erste Zwischenevaluierung des Projektes statt. Den Gutach-



**Abbildung 2:** Aufbau zum elektrochemischen Nachweis der Wasserstoffbildung an pyroelektrischen Kristallen.

tern wurde eine Bewertung der bisher umgesetzten elektrischen Kreisprozesse vorgelegt. Ziel der Literaturrecherche war es, eine für die neuen und innovativen Materialien optimale Kreisprozessführung zu bestimmen. Zudem wurden Möglichkeiten der entsprechenden Maschinenkonzepte auf Basis pyroelektrischer Funktionsmaterialien simuliert.

Im zweiten Teil des Projekts, der pyroelektrisch getriebenen Wasserstofferzeugung, konnte ein einfacher elektrochemischer Aufbau zum Nachweis der Wasserstoffbildung realisiert werden (siehe Abbildung 2). Die hierfür angefertigte Messzelle bietet verschiedene Messmodi im gewählten Elektrolyten sowie an der pyroelektrischen Oberfläche.

Dank des regen Austauschs der beteiligten Partner und dem zielorientierten Vorgehen befindet sich das Projekt auf einem vielversprechenden Weg zu neuen Erkenntnissen auf dem Gebiet der Anwendung pyroelektrischer Materialien.

Wir danken der SAB und dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (100245339) für die finanzielle Unterstützung.



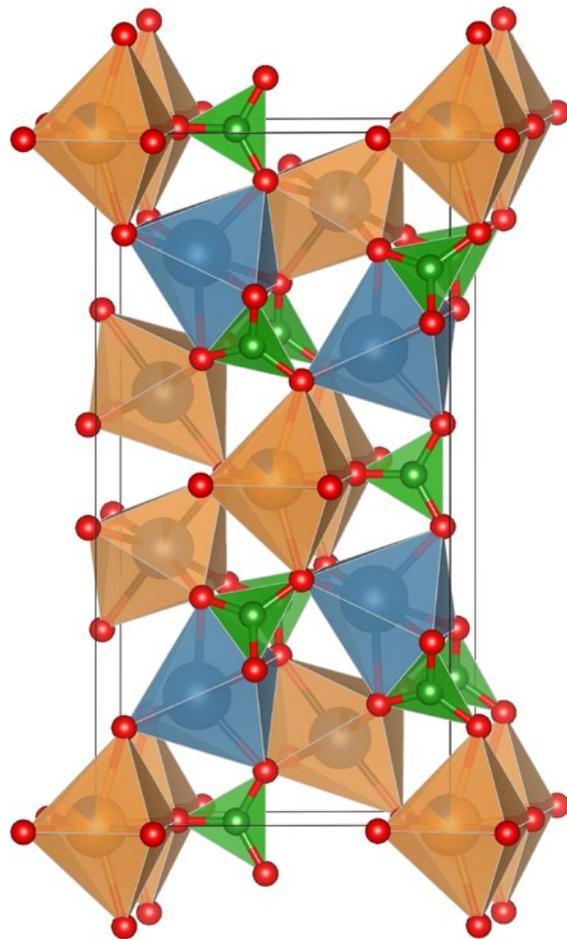
## Pyro- und dielektrische Eigenschaften von Hochtemperaturpiezoelektrika der Oxoborat-Familie $RX_2Z_2O(BO_3)_3$ ( $X, Z = Ca, R = La, Y, Gd, Pr, Nd, Er$ )

Der DFG-Paketantrag 921 besteht aus insgesamt drei Forschungsvorhaben der Arbeitsgruppen Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg (Prof. Jens Götzke), Kristallphysik der Ruhr-Universität Bochum (Prof. Jürgen Schreuer) und der Arbeitsgruppe von Prof. Dirk C. Meyer am IEP. Dieser Verbund, der im September 2016 die Arbeit aufnahm, hat die Erarbeitung von Korrelationen zwischen Struktur und elektromechanischen Eigenschaften von Kristallen der Familie  $RX_2Z_2O(BO_3)_3$  zum Ziel. Bei diesen Oxoboraten (kurz RCOB) bilden die Verbindungen mit  $X, Z = Ca$  und  $R = La, Y, Gd, Pr, Nd$  und  $Er$  den Schwerpunkt (siehe Abbildung 1). Motiviert wird das Vorhaben durch:

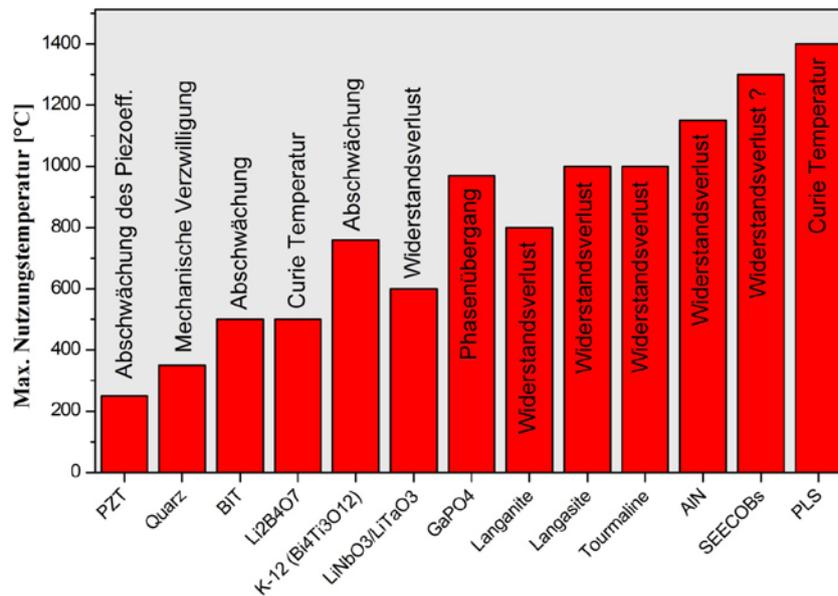
- die monokline Symmetrie dieser piezoelektrischen Materialien, wodurch sich mehr Freiheitsgrade für die Anisotropie der Eigenschaften und damit für Korrelationen zwischen Struktur und Eigenschaften ergeben als in höhersymmetrischen Kristallen,
- die in Vorarbeiten beobachteten Diskontinuitäten im temperaturabhängigen Verlauf verschiedener Eigenschaften, die auf mögliche strukturelle Instabilitäten hindeuten,
- die zahlreichen Substitutionsmöglichkeiten auf den unterschiedlich koordinierten Kationenplätzen und die daraus resultierende große, nur teils erfasste chemische Variabilität,
- die zumindest für einige Vertreter nachgewiesene Möglichkeit der Züchtung großer Einkristalle aus der Schmelze und nicht zuletzt
- das große Potential für piezo- und pyroelektrische Anwendungen bei hohen Temperaturen.

Um die Eigenschaften auf atomarer Ebene mit denjenigen auf makroskopischer Ebene zu korrelieren,

soll einerseits die Nah- und Fernordnung mittels spektroskopischer Verfahren sowie Beugungsmethoden studiert und andererseits die elektromechanischen Eigenschaften im weitesten Sinne untersucht werden. Dazu gehören Wärmeausdehnung und Wärmekapazität, elastische und piezoelektrische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit und pyroelektrische Eigenschaften sowie ihre Abhängigkeiten von chemischer Zusammensetzung und Temperatur.



**Abbildung 1:** Darstellung des Strukturmodells von  $RCa_4O(BO_3)_3$  in der Raumgruppe  $Cm$ , wobei die  $b$ -Achse nach oben zeigt und die Atome in folgenden Farben dargestellt sind: R orange, Ca blau, O rot, B grün.



**Abbildung 2:** Ferroelektrische Einkristall-Materialien und deren, teils vermutete, maximale Einsatztemperatur als Piezoelektrikum im Vergleich zu PZT- und PLS-Keramiken.

Die Oxoborate der Familie  $RX_2Z_2O(BO_3)_3$  wurden in den vergangenen Jahren vor allem im Hinblick auf ihre optischen Charakteristika erforscht. Durch ihre monoklin domatische Struktur (Raumgruppe  $Cm$ ), weisen sie ebenfalls pyro- und piezoelektrische Eigenschaften auf, die weit weniger erforscht sind. Sowohl  $Ca_4GdO(BO_3)_3$  (GdCOB) als auch  $Ca_4YO(BO_3)_3$  (YCOB) werden in der Literatur bis  $1200^\circ C$  als unverändert piezoelektrisch beschrieben.

Pyroelektrische Materialien der Perowskitfamilie (z. B.  $Pb(Zr,Ti)O_3$ ,  $BaTiO_3$ ) oder auch verschiedene Niobate und Tantalate (z. B.  $LiNbO_3$ ,  $LiTaO_3$ ) sind durch die Curie-Temperatur, Relaxationsphänomene oder die mit der Temperatur steigende elektrische Leitfähigkeit in ihren pyro- und piezoelektrischen

Eigenschaften auf weit unterhalb einer Temperatur von  $1000^\circ C$  eingeschränkt. Einzig sogenannte PLS (*Perovskite-like Layer Structures*) sind nach bisherigen Erkenntnissen in der Lage, bis etwa  $1300^\circ C$  piezoelektrisch zu arbeiten (siehe Abbildung 2). Im Einkristallbereich zeigen die RCOB-Materialien damit den größten Temperaturbereich, in dem ein messbarer piezo- und eventuell auch pyroelektrischer Effekt zu erwarten ist.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung (Projektnummer: ME 1433/14-1).

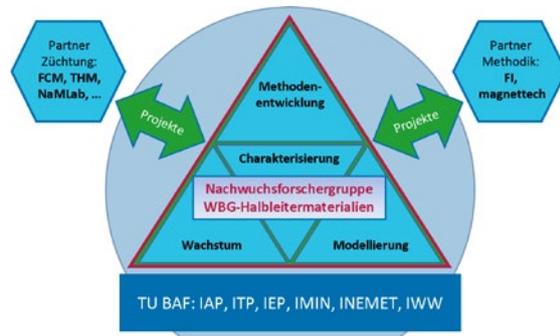


## ESF-Nachwuchsforschergruppe HALMA

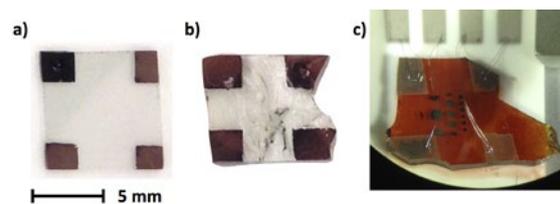
Die ESF-Nachwuchsforschergruppe „Defekt-Engineering in Wide-Bandgap-Halbleitermaterialien für Anwendungen in der Opto- und Leistungselektronik“ (HALMA) besteht seit Oktober 2015 und bündelt die an der TU Bergakademie Freiberg ansässigen Kompetenzen hinsichtlich Kristallzüchtung und Charakterisierung von Halbleitermaterialien und vernetzt diese mit Kooperationspartnern aus der Freiburger Halbleiterindustrie (siehe Abbildung 1). Projektpartner sind neben dem Institut für Angewandte Physik (IAP) die Institute für Experimentelle Physik (IEP), Theoretische Physik (ITP), Allgemeine und Angewandte Mineralogie (IMIN), Nichteisen-Metallurgie und Reinstoffe (INEMET) sowie das Institut für Werkstoffwissenschaft (IWW).

Die Gruppe verfolgt das Ziel, eine Verbesserung der Verfügbarkeit sowie eine erhöhte Funktionalität des Verbindungshalbleiters Galliumnitrid (GaN) und verwandter (nitridischer) Halbleiter mit großer Bandlücke, wie z. B. Aluminiumnitrid (AlN), zu erreichen. Schwerpunkt ist dabei die fundierte und umfassende Charakterisierung der Proben als Grundlage für eine gezielte Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses. Die Proben durchlaufen dafür einen definierten Charakterisierungsplan, dessen experimentelle Befunde in einer gruppeninternen Datenbank festgehalten werden. So können Ergebnisse verschiedener Messmethoden miteinander korreliert und Abhängigkeiten zwischen den Kristallzüchtungsparametern sowie den mikrostrukturellen, optischen und elektrischen Eigenschaften identifiziert werden. Daraus erlangte Erkenntnisse der involvierten Prozesse wiederum sollen helfen, die Herstellungstechnologie zu optimieren und neue Messmethoden zu entwickeln.

Mittels Hochtemperatur-Gasphasenepitaxie (*High-Temperature Vapor Phase Epitaxy* – HTVPE) werden vom Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinstoffe (INEMET) einkristalline GaN-Schichten auf Saphir abgeschieden. Der HTVPE-Prozess kann dabei systematisch untersucht und beeinflusst werden, sodass ein gezieltes Defekt-Engineering möglich ist.



**Abbildung 1:** Struktur der institutsübergreifenden Nachwuchsforschergruppe HALMA. Die Gruppe arbeitet eng mit industriellen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen zusammen.



**Abbildung 2:** Hall-Proben mit ohmschen Kontakten in Van-der-Pauw-Geometrie: (a) HTVPE-GaN auf Saphir, (b) freistehendes GaN, (c) auf Probenhalter gebundene freistehende dotierte GaN-Probe.

Kernstück ist dabei eine induktiv beheizte Verdampfungszelle, die in Kooperation mit der Firma FCM patentiert wurde.

Während des Wachstums von GaN auf fremden Substraten (typischerweise Saphir) entstehen Misfit-Versetzungen, die sich als Threading-Versetzungen von der Substrat-Grenzfläche bis zur Oberfläche des GaN-Kristalls ausdehnen und die Gitterfehlpassung teilweise kompensieren. Die daraus resultierenden Defekte können spätere Bauelemente beeinflussen und werden in der Gruppe deshalb charakterisiert. Die dafür verwendeten Methoden umfassen die Mikrostrukturaufklärung (IWW), elektrische Charakterisierung (IEP und IAP) sowie optische Charakterisierung (IAP und ITP).

Im Bereich der elektrischen Charakterisierung wurde u. a. ein bestehender Hall-Messplatz des IEP wieder in Stand gesetzt und in Betrieb genommen. Um

den Messaufwand zu verringern, wurde außerdem ein neuer Probenhalter konstruiert und die Steuer- software grundlegend überarbeitet. So konnten die elektrischen Eigenschaften wie der spezifische Schichtwiderstand, die Ladungsträgerkonzentration und -mobilität von einer großen Anzahl Proben aus dem HTVPE-Prozess und vom Kooperationspartner FCM bestimmt werden (siehe Abbildung 2). Als elektrischer Kontakt zu GaN werden die im Zent- ralen Reinraumlabor entwickelten und mittels Sput- terdeposition abgeschiedenen Ti/Al/TiN-Kontakte in Van-der-Pauw-Geometrie verwendet. Die GaN- Proben werden anschließend mit Silberdrähten auf den Probenträger gebondet, bevor sie gemessen werden können (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Kontaktierte GaN-Probe auf Probenträger. Im Hintergrund befinden sich die Hall-Magneten.



## REXSuppress – Resonante Röntgendiffraktion unter optimierter destruktiver Interferenz zur hochsensitiven Bestimmung phasenaufgelöster lagespezifischer Atomverrückungen in kristallinen Materialien

Seit Oktober des Jahres 2016 gibt es am Institut für Experimentelle Physik (IEP) das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschungsprojekt REXSuppress zur methodischen Weiterentwicklung resonanter Röntgenbeugungsmethoden am Synchrotron.

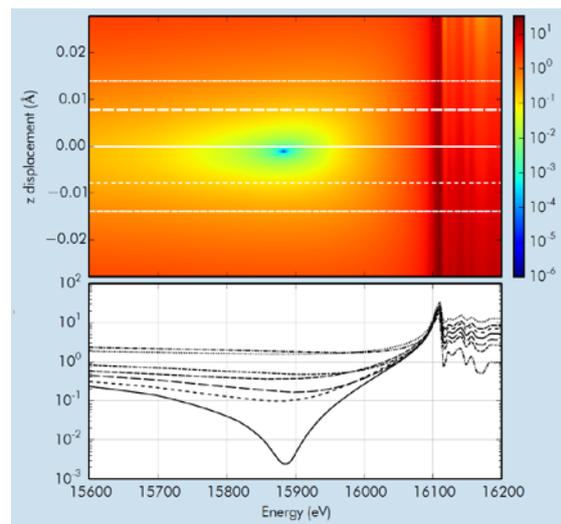
Das Projekt „Resonante Röntgendiffraktion unter optimierter destruktiver Interferenz zur hochsensitiven Bestimmung phasenaufgelöster lagespezifischer Atomverrückungen in kristallinen Materialien“ verfolgt laut DFG einen hochinnovativen neuen Ansatz der Kristallographie zur Bestimmung kleinster Abweichungen der elementspezifischen Ordnung in der idealen Kristallstruktur. Kern der Methode ist die Ausnutzung destruktiver Röntgeninterferenz bei resonant unterdrückten Beugungsbedingungen. Dem neuen Ansatz werden außerordentliche Relevanz und ein hohes Potential im Hinblick auf Strukturuntersuchungen zu dynamischen Prozessen, z. B. bei Polarisation und Phasenumwandlung, beigemessen.

REXSuppress bietet u. a. einzigartige Perspektiven zur Untersuchung von strukturellen Defekten in kristallinen Festkörpern. Diese Defekte und ihre strukturelle Nahordnung bestimmen eine Vielzahl technisch relevanter Eigenschaften und sollen nun extrem genau vermessen werden. Dadurch sind Innovationen insbesondere im Bereich der Halbleiterindustrie, bzw. der Daten- und elektrochemischen Energiespeicherung zu erwarten.

In den vergangenen sechs Jahren hat sich die IEP-Arbeitsgruppe von Prof. Dirk C. Meyer beim Aufbau der neuen *Chemical Crystallography Beamline* im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Schwerpunktes „Erforschung kondensierter Materie an Großgeräten“

durch einen Mitarbeiter vor Ort aktiv engagiert. Sie bildet ab dem Jahr 2017 eine der neuen Experimentierstationen des Speicherrings Petra III am DESY in Hamburg. Neben chemischer Kristallographie stehen vor allem Schwerpunkte der Material- sowie der Geo-, Bio- und Umweltwissenschaften im Fokus der geplanten Forschung. Typische Anwendungen umfassen dabei sowohl Elektronendichteanalysen als auch die Aufklärung fehlgeordneter und modulierter Strukturen unter dem Einfluss von externen Feldern bei hohen Drücken und hohen bzw. tiefen Temperaturen.

Die Kontinuität dieses Engagements am Synchrotron wird nun durch REXSuppress ermöglicht und die Präsenz mit vertieft wissenschaftlicher Ausrichtung fortgeführt. Die Leitung des Projekts wird durch



**Abbildung 1:** Destruktive Interferenz in der resonanten Röntgendiffraktion des 306-Bragg-Reflexes in kubischem Strontiumtitanat. Am Beispiel der Auslenkung des zentralen Titanatoms in z-Richtung ist das Auflösungsvermögen der neuen Methode im Sub-Pikometerbereich ersichtlich.

Herrn Dr. Matthias Zschornak wahrgenommen, der die Aktivitäten der Arbeitsgruppe am Synchrotron koordiniert und in seiner Promotion maßgeblich zur methodischen Weiterentwicklung der resonanten Röntgendiffraktion als Kombination von Röntgenbeugung und -spektroskopie beigetragen hat. Die bisher zumeist getrennt betriebenen methodischen Ansätze werden dabei in übergeordneter Qualität zusammengeführt und bilden neue Perspektiven, um Feinheiten der Struktur zu analysieren. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren im Labor wird in der resonanten Röntgendiffraktion die Röntgenenergie variiert. Dadurch ist es möglich jede atomare Spezies innerhalb des Kristalls als Sonde zu nutzen. Damit können minimale Verrückungen sichtbar gemacht und im selben Experiment zusätzlich auch Röntgenspektroskopie betrieben werden. Herr Dr. Carsten Richter und Frau Dipl.-Nat. Melanie Nentwich werden in bewährter Weise und unterstützt von Frau M. Sc. Tina Weigel die Messreisen ans Synchrotron bzw. auch die theoretische Modellierung fortsetzen.



**Abbildung 2:** Die resonante Röntgendiffraktion wird insbesondere an der *Chemical Crystallography Beamline* am DESY Synchrotron PETRA III (Halle Ost) in Hamburg ab dem Jahr 2017 für die Forschung zur Verfügung stehen (© DESY 2015).

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung (Projektnummer: ME 1433/15-1).

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

## 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 Vollantrags 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-

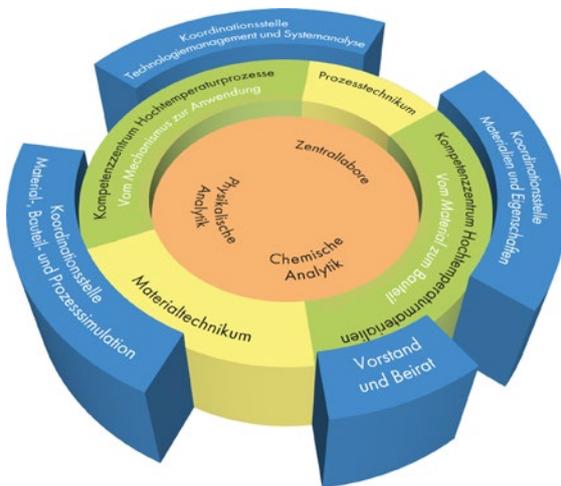


Abbildung 1: Schema der Teilbereiche des ZeHS.

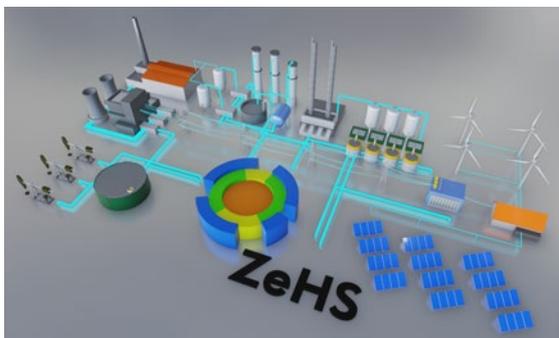


Abbildung 2: Einbindung der Forschungsprogrammatis des ZeHS in den systemischen Gesamtzusammenhang von Stoff- und Energiekreisläufen.

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 Überschussener-

gie – 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 industriekaligen 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 Forschungsprogrammatis 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 Forschungsprogrammatis 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 Ordnung, welche Einzelheiten zur Struktur und zur Arbeit des Zentrums regelt.

### Kompetenzzentren „Hochtemperaturprozesse“ und „Hochtemperaturmaterialien“

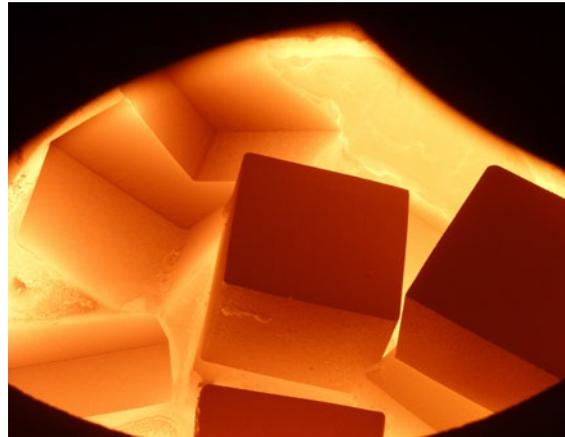
Die Forschungsschwerpunkte des ZeHS werden durch die zwei komplementären Kompetenzzentren „HT-Prozesse – Vom Mechanismus zur Anwendung“ sowie „HT-Materialien – Vom Material zum Bauteil“ vertreten. Diese beiden Kompetenzzentren sollen die wissenschaftlichen Entwicklungslinien des ZeHS geschlossen bearbeiten. 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 Fügechnik, 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



**Abbildung 3:** Stahlgussimulator zum Aufschmelzen von Stahlstücken sowie Umfüllen der Schmelze am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik.

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 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 Materialtechnikum

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 Prozesstechnikum 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 m<sup>2</sup> 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



Abbildung 4: Entwurfsansicht des Treppenhauses des ZeHS.

für bis zu 145 wissenschaftliche und 33 nichtwissenschaftliche Mitarbeiter.

### Einige Splitter zur architektonischen Umsetzung des Forschungsbaus

Violettes Mineral ... so beschrieb das „BauNetz“ – eine deutschsprachige Online-Publikation, die täglich aus der internationalen Architekturwelt berichtet – den Entwurf für den Forschungsbau des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) von Heinle, Wischer und Partner, Freie Architekten aus Dresden.

Die Architekten bewarben sich im Januar 2016 um die Planung des Vorhabens und konnten sich in der zweiten Phase des Verhandlungsverfahrens im Wettbewerb durchsetzen. Die Entscheidung für diesen Entwurf wurde vom Auftraggeber Sächsisches Immobilien- und Baumanagement Niederlassung Chemnitz unter anderem damit begründet, dass er den städtebaulichen Leitgedanken eines „Wissenschaftskorridors“ berücksichtige. Hinzu wurde die Unterteilung des Raumprogrammes in Labor, Versuchshalle und Büro, durch die kurze Wege und Aufweitungen an hochfrequentierten Bereichen und damit die optimale die Nutzung des ZeHS als Forschungs- und Austauschort für alle Fakultäten der Hochschule ermöglicht werden, hervorgehoben.

Das zu errichtende ZeHS befindet sich nördlich des Stadtzentrums von Freiberg auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg und bildet einen Bestandteil des „Wissenschaftskorridors“. Vorteilhaft ist die unmittelbare Nähe zur Neuen Mensa sowie dem neuen Bibliotheks- und Hörsaalzentrum, etwa für die Ausrichtung von Konferenzen zu Forschungsgegenständen des ZeHS.

Das Gebäude des ZeHS soll aus einem Büroteil, welcher über vier Geschosse verfügt, bestehen, an den sich zweigeschossige Laborspangen anschließen, die einen Innenhof umsäumen und im zusätzlichen Kellergeschoss über die erforderlichen Technikflächen verfügen.

Die beiden Labortrakte werden von Technikumshallen begrenzt, wobei eine inhaltliche Zuordnung zu



Abbildung 5: Entwurf zur Außenansicht des ZeHS.

den beiden Bereichen „Prozesse“ und „Materialien“ planerisch zugrunde gelegt wird. Vorgesehen ist die Nutzung durch Arbeitsgruppen aller Fakultäten der Bergakademie, wobei eine infrastrukturelle Bündelung der Kompetenzen der Universität im Bereich der Hochtemperaturprozesse und -materialien und deren Ausbau und Arrondierung ermöglicht wird.

Das Gesamtgebäude ist in Bezug auf seine Geschosse differenziert abgestuft und fügt sich damit in den städtebaulichen Maßstab sowie den Konturverlauf der Umgebung ein. Der Neubau folgt der fußläufigen Verbindung von Campus und Altstadt und erhält seinen Haupteingang an dieser.

Durch die Aufnahme der vorgegebenen Materialität für die Fassaden im Außenbereich und die Assoziation eines aufgespaltenen Minerals für die gegensätzliche Innenhofgestaltung wird das Gebäude in Freiberg verortet. Das Ansinnen, den Innenhof des ZeHS einem Kristall vergleichbar zu gestalten, regte einen Kommentator im Forum des „BauNetz“ dazu an, den Entwurf als ein Anknüpfen an die vom Architekten Bruno Taut (1880–1938) versuchte „alpine Architektur“, in der dieser sich der Verschmelzung von Architektur und Natur widmete, zu sehen.

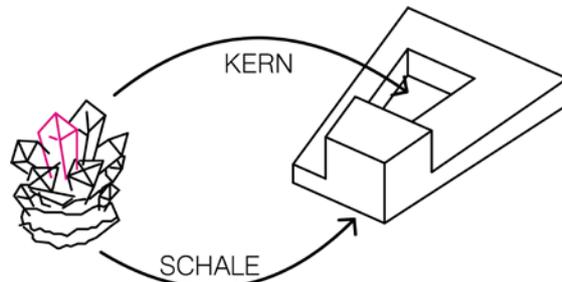


Abbildung 6: Die Grundidee eines aufgespaltenen Minerals, das von einer äußeren Schale umschlossen ist, prägt den Entwurf.

Bruno Taut hatte im Jahr 1919 eine Reihe kristallartiger Bauten, mit denen er die Alpen in eine fantastisch-expressionistische Kunstlandschaft verwandeln wollte, entworfen. Bekannt wurde er vor allem durch Großsiedlungen in Berlin im Stile des Neuen Bauens, einer Bewegung in Architektur und Städtebau in Deutschland in der Zeit vor dem 1. Weltkrieg bis in jene der Weimarer Republik.

#### 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 Mitte 2017 vorgesehen. Mit dem Ende der Bauausführung ist Mitte des Jahres 2020 zu rechnen.

## Stipendien

- Diana Karsch: **SAB-Landesinnovationspromotion zu „Pyroelektrisch ablösbaren Schichten“**, Arbeitsgruppe Prof. Meyer, Oktober 2016 – September 2019
- Tina Nestler: **DAAD IPID4all Young GEOMATENUM International Reisestipendium**, Teilnahme am *International Symposium on Systems with Fast Ionic Transport*, Kaunas, Litauen, 3. – 7. Juli 2016
- Tina Weigel: **Federmann-Stipendium für einen Forschungsaufenthalt in Israel**, Arbeitsgruppe Prof. Doron Aurbach, *Bar-Ilan University, Department of Chemistry*, Ramat Gan, Israel, Januar – Juni 2017

Lehre

## ESF-Finanzierung zur Verbesserung der Physiklehre

Der Europäische Sozialfonds fördert ab Anfang des Jahres 2017 unter der Antragsnummer 100298803 das Projekt „Ausgleich unterschiedlicher fachlicher und nicht-fachlicher Qualifikationen in der Studieneingangsphase“. Das Projekt unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Eiermann (Fakultät für Mathematik) zielt unter anderem darauf, durch Verbesserung der Lehre und die Implementierung eines Physikvorkurses die Studienanfänger besser zu betreuen, damit bei Studienantritt vorhandene Defizite so gut wie möglich aufgefangen werden und weniger Studenten wegen des Nichtbestehens der grundlegenden naturwissenschaftlichen Fächer schon in den ersten Jahren vom Studium ausscheiden. Bereits vor Beginn des ersten Semesters sollen Studienanfänger im Rahmen eines eintägigen Physikvorkurses fundamentale Physikkenntnisse auffrischen. Dieser Vorkurs wird zusammen mit einem Chemie- und einem Mathematikvorkurs in den ersten Oktoberwochen stattfinden. Vorbereitungen für dieses Projekt hatte Prof. Dr. Dirk C. Meyer als Prorektor der TU Bergakademie Freiberg zurückliegend getroffen.

Zusätzlich sollen die Übungen der Lehrveranstaltungen „Physik für Naturwissenschaftler I/II“ so umgestaltet werden, dass die Motivation der Studenten, sich aktiv und intensiv mit den Übungsaufgaben auseinanderzusetzen, gesteigert wird. Ende 2016 wurde durch die Zusammenarbeit mehrerer Kollegen bereits der erste Stein gelegt: ein OPAL-basierter Onlinekurs bestehend aus 20 Kapiteln, die die In-

halte der obengenannten Kurse umfassen, wurde erstellt. Dieser Kurs mit prägnanten Erläuterungen zur Theorie, Zwischentests und einem Abschluss-test wird den Studenten auf ihrem Lernweg 2017 semesterbegleitend zur Seite stehen. Ergänzend wird die Methodik der Übungen aus didaktischer Sicht komplett überarbeitet, sodass sich zunehmend Methoden zur Aktivierung des studentischen Lernprozesses darin wiederfinden. Diese können beispielsweise das Abwechseln zwischen passivem Mitschreiben und aktiver Gruppenarbeit, das Integrieren inhaltsrelevanter Videos sowie elektronischer Abstimmungssysteme umfassen. Dabei wird der Fokus leicht vom Rechnen eher in Richtung Verständnis gelegt. Im Wintersemester 2016/17 werden Verständnisfragen in den Klausuren implementiert, die auf die konzeptionelle Erklärung einer physikalischen, alltagsbezogenen Situation abzielen.

Das Konzept zur Reduktion der Studienabbrecherzahlen darf keineswegs auf Kosten des Niveaus erfolgen. Den Studenten werden vielmehr neue Möglichkeiten für ihre Vorbereitung angeboten und universitätsgeeignete Lernmethoden beigebracht, um sie mit passenden Lernwerkzeugen für ihr Studium auszustatten.



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.



Europäischer Sozialfonds

## HERCULES-European School – 5 Wochen mit Röntgenstrahlen und Neutronen

Seit 1991 findet jedes Jahr im März der HERCULES-Kurs in Grenoble, Frankreich statt. Dieser fünfwöchige, internationale Kurs bietet 72 Teilnehmern verschiedener Forschungsgebiete (Biologie, Chemie, Physik, Materialwissenschaften, Geowissenschaften) die Möglichkeit, vieljährige Röntgen- und Neutronentechniken kennenzulernen und sogar an verschiedenen Großforschungseinrichtungen anzuwenden. In diesem Jahr konnte die Promotionsstudentin Dipl.-Math. Melanie Nentwich diese einmalige Gelegenheit nutzen, um ihr Wissen im Bereich der Röntgenmethoden zu erweitern.

Der Kurs begann mit Grundvorlesungen und Auffrischungsstunden zu den Themen Kristallographie, Spektroskopie, Magnetismus und vielem mehr. Die erste Woche wurde aufgelockert durch Führungen in der Neutronenquelle *Institute Laue-Langevin* (ILL) und der Röntgenquelle *European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) und auch durch soziale Aktivitäten wie dem Cocktail-Abend, einer *Postersession*, einem *Willkommens-Dinner* und einer Schneeschuhwanderung. In der zweiten Woche wurden die Vorlesungen spezialisierter und es gab zusätzliche kleinere Seminare und Praktika am ILL. Die dritte Woche startete mit Praktika am ESRF, wo einige Teilnehmer Messungen an „verbotenen“ Reflexen vornehmen konnten.



**Abbildung 1:** Praktikum an Beamline ID20 des ESRF. Im Vordergrund ist ein sphärischer Kristallanalysator für resonante inelastische Röntgenstreuung zu sehen.

Während der vierten Woche wurden alle Teilnehmer in drei kleinere Gruppen aufgeteilt, um Versuche an anderen Röntgen- und Neutronenquellen außerhalb von Grenoble durchzuführen. Sie fuhren nach Villigen (Schweiz), Trieste (Italien) oder Paris (Frankreich).

Das Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen umfasst ein Synchrotron, eine Neutronenspallationsquelle, eine Myonenquelle und einen Freie-Elektronen-Laser. Diese Forschungseinrichtung überraschte mit ihrer außerordentlich ländlichen Umgebung. Hier ist fokussierte Forschung garantiert. Die Unterbringung erfolgte im Gästehaus, mit einem luxuriösen Fernsehraum, großer Küche und (am wichtigsten) dem Freizeitzimmer mit Tischfußball und Darts. Es gab Führungen durch alle wichtigen Teile der Einrichtung, sogar durch die Tunnel des Synchrotrons und des SwissFEL. Theoretisch wurde der Aufenthalt durch viele spezialisierte Vorlesungen abgerundet. In kleinen Teams à 4 Personen wurden Experimente an verschiedenen Beamlines durchgeführt. Jedes Team untersuchte dabei verschiedene Proben mit unterschiedlichen Techniken während zweier ganztägiger Experimente. Dabei ging es nicht nur um das modellhafte Verstehen der Techniken, sondern vor allem auch um echte Messerfahrung mit mehr oder weniger vielen Herausforderungen. Die



**Abbildung 2:** Blick in die Halle der Neutronenspallationsquelle (SINQ) am Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen, Schweiz.



**Abbildung 3:** Vakuumrohre aus Kupfer im 740 m langen Tunnel des SwissFEL (Schweizer Freie-Elektronen-Laser) in Villigen, Schweiz.

gesammelten Erfahrungen wurden abschließend durch Präsentationen mit den anderen Teilnehmern geteilt.

Die Gruppen in Paris und Trieste erlebten ein ähnliches Programm an den Synchrotrons SOLEIL und ELETTRA sowie den Neutronenquellen LLB und FERMI. In Paris haben die einzelnen Teams jedoch eine „vollständige“ Analyse einer Probe vorgenommen, statt die Probe zu wechseln. In Trieste stand den Teilnehmern wegen eines Wasserlecks kein Röntgenstrahl zur Verfügung. Durch gute Organisation konnte diese Gruppe jedoch auf andere Untersuchungsmethoden ausweichen.

In der letzten Woche kamen alle Teilnehmer zurück nach Grenoble, um die abschließenden Vorlesun-

gen und Seminare zu besuchen. Die Schule endete am Donnerstag mit einer Präsentation über das Leben des mythischen Hercules, gefolgt von einer Abschiedsfeier mit Wein und Käse von der sich Stück für Stück die Teilnehmer verabschiedeten, um nach Hause zu ihrer Familie, Freunden und Wissenschaft zurückzukehren.

Dieser Kurs war eine einmalige Gelegenheit, um „alles“ über Synchrotron- und Neutronentechniken zu lernen und auch um ein weltweites Netzwerk mit anderen Wissenschaftlern aus ähnlichen Forschungsgebieten aufzubauen.

Die Anmeldung ist jedes Jahr im September und Oktober offen für alle Interessierten:

<http://hercules-school.eu>

## 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 zum *European XFEL* in Hamburg durch die Mittel des Programms „Dritte Säule des Hochschulpakts“ im Rahmen des Projekts 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 Abbildung 1). Vor Ort führten erfahrene Wissenschaftler die Studierenden durch alle Bereiche des Forschungszentrums und erläuterten anhand konkreter Experimente die wissenschaftlichen Fragestellungen.

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

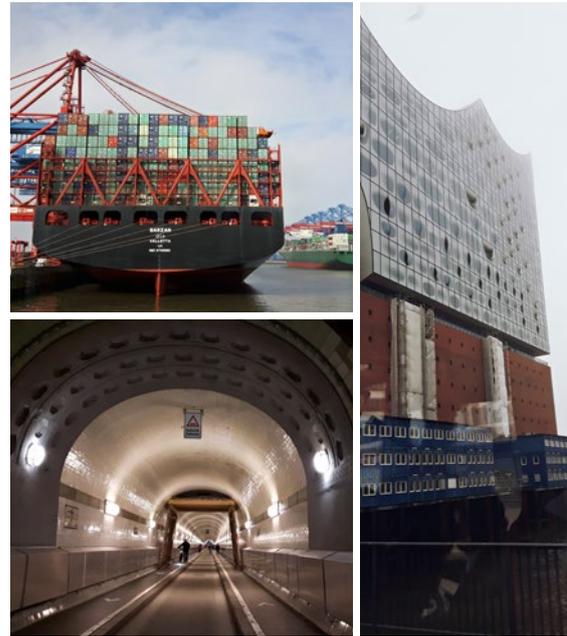
Das diesjährige 3-Tages-Programm der Freiburger startete mit einer Einführungsvorlesung durch Herrn Dr. Jan Grünert, Gruppenleiter der „X-ray Photon Diagnostics“. In seinem Vortrag erklärte er prinzipi-



**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.



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

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

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

Abgerundet wurde die Exkursion am Freitag mit einer besonderen Bustour. Die umfangreiche Rundfahrt führte 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 Kulissen von Deutschlands größtem Seehafen ermöglichte (siehe Abbildung 3).

## Junge Kristallographen

Seit seiner Gründung vor vier Jahren auf der 21. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie (DGK) in Freiberg ist der Arbeitskreis „Junge Kristallographen“ ein fester Bestandteil der DGK. Inzwischen hat der Arbeitskreis mehr als 160 Mitglieder aus 13 verschiedenen europäischen und nicht-europäischen Ländern. Die Mitglieder des Arbeitskreises gehören zu allen Fachbereichen, die die Kristallographie als Mittel zur Strukturaufklärung nutzen.

Der Arbeitskreis präsentiert sich online auf einer umfassenden Website im Rahmen der DGK-Homepage (<http://dgk-home.de/aks/jkyc/>) sowie mit einem detaillierten und regelmäßig aktualisierten Blog. Die Jungen Kristallographen treffen sich regelmäßig während der DGK-Frühjahrstagungen. Bisher konnten sie auch jeweils ein weiteres Treffen im Herbst organisieren, entweder an einer deutschen Hochschule oder zu einem *Lab Meeting*.

Im September 2016 fand das *2<sup>nd</sup> Meeting of the Young Crystallographers* in Berlin statt. Finanziell unterstützt durch die Industriepartner STOE, PANalytical, DECTRIS, Excillum, Bruker und Netzsch sowie dem Fonds der chemischen Industrie und der DGK selbst, konnten knapp 30 Teilnehmer ihre aktuellen Forschungsfragen miteinander diskutieren.

Am 5. und 6. September 2017 wird das *2<sup>nd</sup> Lab Meeting@STOE* in Darmstadt stattfinden. Die Organisation ist bereits in vollem Gange. An diesen beiden Tagen wird es neben den bewährten *Lightning Talks* + Postern auch Touren durch die Labore von STOE geben sowie Nähkästchen-Talks aus Industrie und Akademie und ein *Barbecue*.

Ein großes Dankeschön gilt den ehemaligen Sprechern des Arbeitskreises Julia Dshemuchadse und Oliver Pecher, die auch im vergangenen Jahr aktiv an Planung und Organisation beteiligt waren und immer beratend zur Seite standen. Die Leitung des Arbeitskreises hat Melanie Nentwich (IEP) in 2016 für 2 Jahre übernommen.



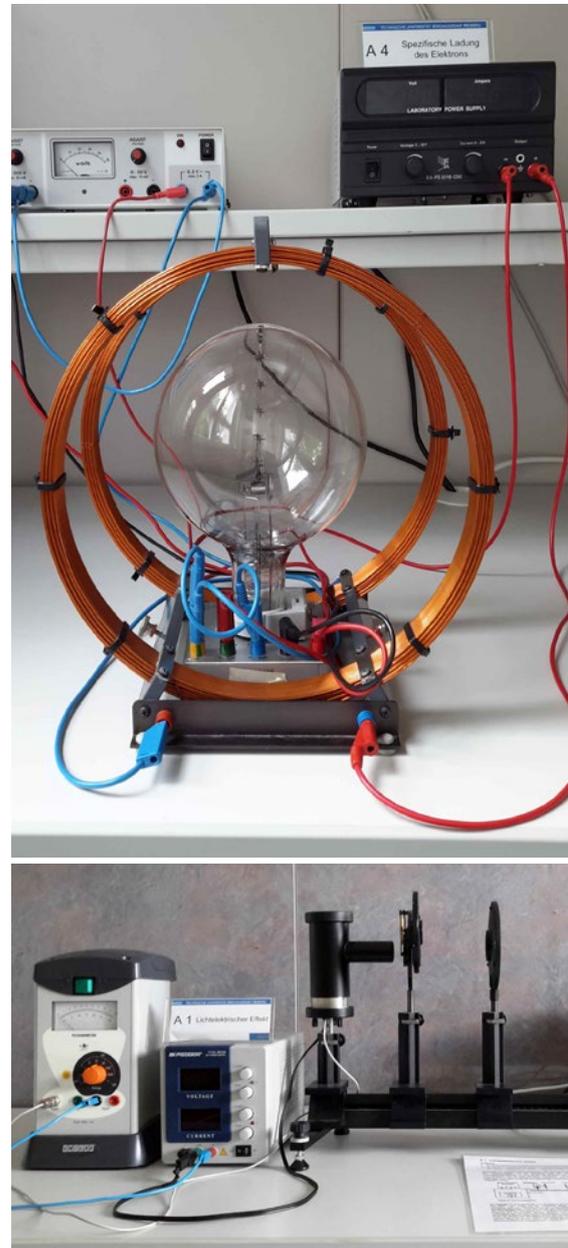
**Abbildung:** Eindrücke vom *2<sup>nd</sup> Meeting of the Young Crystallographers* in Berlin 2016.

## Physikalisches Grundpraktikum

Dieses Praktikum zu den Vorlesungen „Physik für Naturwissenschaftler“ und „Physik für Ingenieure“ absolvieren ca. 600 Studierende pro Jahr. Für neun naturwissenschaftliche Studiengänge (z. B. Naturwissenschaften, 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 je zweifach in den Räumen des IEP angeordnet sind, ausgewählt.

Das Praktikum zeichnet sich durch eine moderne Geräteausstattung aus, die auch Schülern zum Kennenlernen der Uni zur Verfügung steht. Das Praktikumsteam betreut auch 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.



**Abbildung:** Aufbauten für die Versuche zur spezifischen Ladung des Elektrons (oben) und zum lichtelektrischen Effekt (unten).

## Angebotene Lehrmodule

- **Energiewandlung und Speicherung**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Florian Mertens, beteiligte Vorlesende: zur Hälfte durch Dr. Holger Neuhaus, Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Halbleitermaterialien**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: 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**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Serguei Molodtsov, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung als Blockveranstaltung am DESY in Hamburg.
- **Moderne Methoden der Festkörperphysik: Magnetische Materialsysteme**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Dr. Kay Potzger, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum.
- **Photovoltaik-Solarmodule – Materialien und Technologie**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Prof. Dr. Ingo Schwirtlich, Wintersemester und Sommersemester, 2 × 2 SWS Vorlesung.
- **Physik der Halbleiter**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Dr. Matthias Zschornak, Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung.
- **Physik für Ingenieure**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Johannes Heitmann, 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**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Dr. Tilmann Leisegang, Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Physik für Naturwissenschaftler II**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 4 SWS Praktikum.
- **Physik und Charakterisierung von Industriesolarzellen**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Dr. Holger Neuhaus, Sommersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Physik und Chemie stark korrelierter Materie**, Modulverantwortlicher: Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk, Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum.

- **Praktikum Energieanlagen**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Hartmut Krause,  
Photovoltaik-Praktikum durch Dr. Wolfram Münchgesang,  
Wintersemester, 1 SWS Vorlesung, 3 SWS Praktikum.
- **Semiconductors (Englisch)**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Dr. Hartmut Stöcker,  
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Solarzellen: Technologie und industrielle Produktion**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Prof. Dr. Ralf Lüdemann,  
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung.
- **Struktur der Materie I: Festkörper**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Dr. Claudia Funke,  
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Struktur der Materie II: Elektronische Eigenschaften**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Dr. Claudia Funke,  
Sommersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung.
- **Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit kristallinen Materialien**,  
Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, beteiligte Vorlesende: Dr. Tilmann Leisegang,  
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung, 2 SWS Praktikum.

# Publikationen

## Wissenschaftliche Publikationen

### Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- B. Khanbabaee, E. Mehner, C. Richter, J. Hanzig, M. Zschornak, U. Pietsch, H. Stöcker, T. Leisegang, D. C. Meyer, S. Gorfman: **Large piezoelectricity in electric-field modified single crystals of SrTiO<sub>3</sub>**, Applied Physics Letters 109 (2016) 222901
- A. Vyalikh, V. Vizgalov, D. M. Itkis, D. C. Meyer: **Investigation of ionic mobility in NASICON-type solid electrolytes**, Journal of Physics: Conference Series 758 (2016) 012014
- S. Jachalke, P. Hofmann, G. Leibiger, F. S. Habel, E. Mehner, T. Leisegang, D. C. Meyer, T. Mikolajick: **The pyroelectric coefficient of free standing GaN grown by HVPE**, Applied Physics Letters 109 (2016) 142906
- T. Köhler, E. Mehner, J. Hanzig, G. Gärtner, H. Stöcker, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Real structure influencing the hydrogen defect chemistry in congruent LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>**, Journal of Solid State Chemistry 244 (2016) 108–115
- S. A. Rounaghi, H. Eshghi, S. Scudino, A. Vyalikh, D. E. P. Vanpoucke, W. Gruner, S. Oswald, A. R. Kiani Rashid, M. Samadi Khoshkhoo, U. Scheler, J. Eckert: **Mechanochemical route to the synthesis of nanostructured Aluminium nitride**, Scientific Reports 6 (2016) 33375
- T. Leisegang (Editor): **Electrochemical Storage Materials: Supply, Processing, Recycling and Modelling – Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials**, AIP Conference Proceedings 1765 (2016)
- R. Schmid, M. Schuster: **New perspectives for lithium ion technology in Germany**, AIP Conference Proceedings 1765 (2016) 020003
- T. Leisegang, F. Treffer: **Recycling of electrochemical storage devices**, AIP Conference Proceedings 1765 (2016) 020006
- O. Pecher, A. Vyalikh, C. P. Grey: **Challenges and new opportunities of in situ NMR characterization of electrochemical processes**, AIP Conference Proceedings 1765 (2016) 020011
- J. Hanzig, M. Zschornak, E. Mehner, F. Hanzig, W. Münchgesang, T. Leisegang, H. Stöcker, D. C. Meyer: **The anisotropy of oxygen vacancy migration in SrTiO<sub>3</sub>**, Journal of Physics: Condensed Matter 28 (2016) 225001
- P. Hofmann, C. Röder, F. Habel, G. Leibiger, F. C. Beyer, G. Gärtner, S. Eichler, T. Mikolajick: **Silicon doping of HVPE GaN bulk-crystals avoiding tensile strain generation**, Journal of Physics D: Applied Physics 49 (2016) 075502
- M. T. Atanasova, A. Vyalikh, U. Scheler, W. W. Focke: **Characterization of rectorite from the Beatrix Gold Mine in South Africa**, Applied Clay Science 126 (2016) 7–16

- A. Bogusz, O. S. Choudhary, I. Skorupa, D. Bürger, A. Lawerenz, Y. Lei, H. Zeng, B. Abendroth, H. Stöcker, O. G. Schmidt, H. Schmidt: **Photocapacitive light sensor based on metal- $\text{YMnO}_3$ -insulator-semiconductor structures**, Applied Physics Letters 108 (2016) 052103
- M. Nentwich, M. Zschornak, C. Richter, D. Novikov, D. C. Meyer: **Analysis of modulated  $\text{Ho}_2\text{PdSi}_3$  crystal structure at Pd K and Ho L absorption edges using resonant elastic X-scattering**, Journal of Physics: Condensed Matter 28 (2016) 066002

## Biomineralogie und Extreme Biomimetik

- V. Mutsenko, O. Gryshkov, Y. Petrenko, V. Grischuk, A. Kotlyarov, P. Schupp, H. Ehrlich, B. Glasmacher, A. Petrenko: **The impact of sucrose pretreatment on survival of mesenchymal stromal cells, cryopreserved in suspension and adherent state**, Cryobiology 73 (2017) 402
- M. Norman, J. Zdarta, P. Bartczak, A. Piasecki, I. Petrenko, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Marine sponge skeleton photosensitized by copper phthalocyanine: A catalyst for Rhodamine B degradation**, Open Chemistry 14 (2016) 243–254
- J. Zdarta, M. Wysokowski, M. Norman, A. Kołodziejczak-Radzimska, D. Moszynski, H. Maciejewski, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Candida antarctica lipase B immobilized onto chitin conjugated with POSS® compounds: Useful tool for rapeseed oil conversion**, International Journal of Molecular Sciences 17 (2016) 1581
- M. Norman, P. Bartczak, J. Zdarta, W. Tomala, B. Zuranska, A. Dobrowolska, A. Piasecki, K. Czaczyk, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Sodium copper chlorophyllin immobilization onto Hippospongia communis marine demosponge skeleton and its antibacterial activity**, International Journal of Molecular Sciences 17 (2016) 1564
- M. Norman, P. Bartczak, J. Zdarta, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **Anthocyanin dye conjugated with Hippospongia communis marine demosponge skeleton and its antiradical activity**, Dyes and Pigments 134 (2016) 541–552
- H. Ehrlich, V. Bazhenov, S. Meschke, M. Bürger, A. Ehrlich, S. Petovic, M. Durovic: **Marine Invertebrates of Boka Kotorska Bay Unique Sources for Bioinspired Materials Science**, In: A. Joksimovic et al. (Eds.), The Boka Kotorska Bay Environment, Series: The Handbook of Environmental Chemistry (2016).
- H. Ehrlich, M. Maldonado, A. R. Parker, Y. N. Kulchin, J. Schilling, B. Köhler, U. Skrzypczak, P. Simon, H. M. Reiswig, M. V. Tsurkan, E. Brunner, S. S. Voznesenskiy, A. V. Bezverbny, S. S. Golik, I. G. Nagorny, D. V. Vyalikh, A. A. Makarova, S. L. Molodtsov, K. Kummer, M. Mertig, C. Erler, D. V. Kurek, V. V. Bazhenov, F. Natalio, A. E. Kovalev, S. N. Gorb, A. L. Stelling, J. Heitmann, R. Born, D. C. Meyer, K. R. Tabachnick: **Supercontinuum Generation in Naturally Occurring Glass Sponges Spicules**, Advanced Optical Materials 4 (2016) 1608–1613
- V. V. Mutsenko, O. Y. Rogulska, Y. A. Petrenko, H. Ehrlich, S. P. Mazur, N. A. Volkova, A. Y. Petrenko: **Cryosensitivity of mesenchymal stromal cells cryopreserved within flat scaffolds derived from skeletons of marine sponges lanthella basta**, Problems of Cryobiology and Cryomedicine 26 (2016) 13–23

- R. Pallela, H. Ehrlich (Eds.): **Marine Sponges: Chemicobiological and Biomedical Applications**, Springer India (2016), eBook ISBN: 978-81-322-2794-6, Hardcover ISBN: 978-81-322-2792-2
- P. V. Bramhachari, H. Ehrlich, R. Pallela: **Introduction to the Global Scenario of Marine Sponge Research**, In: R. Pallela, H. Ehrlich (Eds.): *Marine Sponges: Chemicobiological and Biomedical Applications*, Springer India (2016) 1–23
- B. Lowe, J. Venkatesan, H. Ehrlich, S.-K. Kim: **Global Constraints, Prospects, and Perspectives of Marine Sponge Research**, In: R. Pallela, H. Ehrlich (Eds.): *Marine Sponges: Chemicobiological and Biomedical Applications*, Springer India (2016) 25–35
- R. Pallela, H. Ehrlich, I. Bhatnagar: **Biomedical Applications of Marine Sponge Collagens**, In: R. Pallela, H. Ehrlich (Eds.): *Marine Sponges: Chemicobiological and Biomedical Applications*, Springer India (2016) 373–381
- H. Ehrlich, M. Motylenko, P. V. Sundareshwar, A. Ereskovsky, I. Zglobicka, T. Noga, T. Plocinski, M. V. Tsurkan, E. Wyroba, S. Suski, H. Bilski, M. Wysokowski, H. Stöcker, A. Makarova, D. Vyalikh, J. Walter, S. L. Molodtsov, V. V. Bazhenov, I. Petrenko, E. Langer, A. Richter, E. Niederschlag, M. Pisarek, A. Springer, M. Gelinsky, D. Rafaja, A. Witkowski, D. C. Meyer, T. Jesionowski, K. J. Kurzydowski: **Multiphase Biomineralization: Enigmatic Invasive Siliceous Diatoms Produce Crystalline Calcite**, *Advanced Functional Materials* 26 (2016) 2503–2510
- I. Stepniak, M. Galinski, K. Nowacki, M. Wysokowski, P. Jakubowska, V. V. Bazhenov, T. Leisegang, H. Ehrlich, T. Jesionowski: **A novel chitosan/sponge chitin origin material as a membrane for supercapacitors – preparation and characterization**, *RSC Advances* 6 (2016) 4007–4013
- E. Konowal, A. Modrzejewska-Sikorska, M. Motylenko, L. Klapiszewski, M. Wysokowski, V. V. Bazhenov, D. Rafaja, H. Ehrlich, G. Milczarek, T. Jesionowski: **Functionalization of organically modified silica with gold nanoparticles in the presence of lignosulfonate**, *International Journal of Biological Macromolecules* 85 (2016) 74–81

## Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

- O. Krupin, G. L. Dakovski, B. J. Kim, J. Kim, S. Mishra, Y. D. Chuang, C. R. Serrao, W. S. Lee, W. F. Schlotter, M. P. Minitti, D. Zhu, M. Chollet, R. Ramesh, S. L. Molodtsov, J. J. Turner: **Ultrafast dynamics of localized magnetic moments in the unconventional Mott insulator  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$** , *Journal of Physics: Condensed Matter* 28 (2016) 32LT01
- G. S. Grebenyuk, M. V. Gomoyunova, I. I. Pronin, D. V. Vyalikh, S. L. Molodtsov: **Formation and investigation of ultrathin layers of  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  ferromagnetic alloy synthesized on silicon covered with a  $\text{CaF}_2$  barrier layer**, *Applied Surface Science* 365 (2016) 88–92
- A. A. Yaroslavtsev, M. Izquierdo, R. E. Carley, M. E. Davila, A. A. Unal, F. Kronast, A. I. Lichtenstein, A. O. Scherz, S. L. Molodtsov: **Insight into the spin state at the surface of  $\text{LaCoO}_3$  revealed by photoemission electron microscopy**, *Physical Review B* 93 (2016) 155137

- V. Efimov, A. Ignatov, I. O. Troyanchuk, V. V. Sikolenko, A. Rogalev, F. Wilhelm, E. Efimova, S. I. Tiutiunnikov, D. Karpinsky, V. Kriventsov, E. Yakimchuk, S. Molodtsov, P. Sainctavit, D. Prabhakaran: **Co K-edge Magnetic Circular Dichroism across the Spin State Transition in LaCoO<sub>3</sub> Single Crystal**, Journal of Physics: Conference Series 712 (2016) 012111
- M. K. Rabchinskii, V. V. Shnitov, A. T. Dideikin, A. E. Aleksenskii, S. P. Vul, M. V. Baidakova, I. I. Pronin, D. A. Kirilenko, P. N. Brunkov, J. Weise, S. L. Molodtsov: **Nanoscale Perforation of Graphene Oxide during Photoreduction Process in the Argon Atmosphere**, Journal of Physical Chemistry C 120 (2016) 28261–28269
- F. Roth, C. Lupulescu, E. Darlatt, A. Gottwald, W. Eberhardt: **Angle resolved photoemission from Cu single crystals: Known facts and a few surprises about the photoemission process**, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 208 (2016) 2–10
- H. O. Seo, T. Arion, F. Roth, D. Ramm, C. Lupulescu, W. Eberhardt: **Improving the efficiency of high harmonic generation (HHG) by Ne-admixing into a pure Ar gas medium**, Applied Physics B 122 (2016) 70
- E. Darlatt, B. Muhsin, R. Rösch, C. Lupulescu, F. Roth, M. Kolbe, A. Gottwald, H. Hoppe, M. Richter: **Irradiation-induced degradation of PTB7 investigated by valence band and S 2p photoelectron spectroscopy**, Nanotechnology 27 (2016) 324005
- S. V. Babenkov, O. V. Molodtsova, I. M. Aristova, M. Tchapyguine, S. L. Molodtsov, V. Yu. Aristov: **Hybrid organic-inorganic systems formed by self-assembled gold nanoparticles in CuPcF<sub>4</sub> molecular crystal**, Organic Electronics 32 (2016) 228–236

## Juniorprofessur Kristallphysik

- M. Abramchuk, W. Schnelle, I. Veremchuk, A. Leithe-Jasper, Yu. Grin, R. Gumeniuk: **Crystal Structure, Magnetic, Electronic, and Thermal Transport Properties of Ternary Compounds REReB<sub>4</sub> (RE = Ce, Gd–Er, Yb)**, European Journal of Inorganic Chemistry 2016 (2016) 161–168
- R. Gumeniuk, W. Schnelle, M. A. Ahmida, M. M. Abd-Elmeguid, K. O. Kvashnina, A. A. Tsirlin, A. Leithe-Jasper, C. Geibel: **Valence fluctuations of europium in the boride Eu<sub>4</sub>Pd<sub>29+x</sub>B<sub>8</sub>**, Journal of Physics: Condensed Matter 28 (2016) 115601
- Q. Zheng, W. Schnelle, Yu. Prots, M. Bobnar, U. Burkhardt, A. Leithe-Jasper, R. Gumeniuk: **AlPd<sub>15</sub>B<sub>7</sub>: a new superconducting cage-compound with an anti-Yb<sub>3</sub>Rh<sub>4</sub>Sn<sub>13</sub>-type of structure**, Dalton Transactions 45 (2016) 3943–3948
- Q. Zheng, R. Gumeniuk, W. Schnelle, Yu. Prots, U. Burkhardt, A. Leithe-Jasper: **Synthesis, crystal structure, and physical properties of a new boride Ga<sub>2</sub>Ni<sub>21</sub>B<sub>20</sub> with a modified Zn<sub>2</sub>Ni<sub>21</sub>B<sub>20</sub>-type structure**, Solid State Science 55 (2016) 93–97
- R. Gumeniuk, W. Schnelle, K. O. Kvashnina, A. Leithe-Jasper: **Kondo effect and thermoelectric transport in CePd<sub>3</sub>Be<sub>x</sub>**, Journal of Physics: Condensed Matter 28 (2016) 165603

- Q. Zheng, R. Gumeniuk, H. Borrmann, W. Schnelle, A. A. Tsirlin, H. Rosner, U. Burkhardt, M. Reissner, Yu. Grin, A. Leithe-Jasper: **Ternary borides Nb<sub>7</sub>Fe<sub>3</sub>B<sub>8</sub> and Ta<sub>7</sub>Fe<sub>3</sub>B<sub>8</sub> with Kagome-type iron framework**, Dalton Transactions 45 (2016) 9590–9600
- H. Pfau, M. Nicklas, U. Stockert, R. Gumeniuk, W. Schnelle, A. Leithe-Jasper, Y. Grin, F. Steglich: **Superconducting gap structure of the skutterudite LaPt<sub>4</sub>Ge<sub>12</sub> probed by specific heat and thermal transport**, Physical Review B 94 (2016) 054523
- V. Iurchuk, D. Schick, J. Bran, D. Colson, A. Forget, D. Halley, A. Koc, M. Reinhardt, C. Kwamen, N. A. Morley, M. Bargheer, M. Viret, R. Gumeniuk, G. Schmerber, B. Doudin, B. Kundys: **Optical Writing of Magnetic Properties by Remanent Photostriction**, Physical Review Letters 117 (2016) 107403

## Konferenzbeiträge

### Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- W. Münchgesang, V. Koroteev, T. Zakharchenko, D. Itkis, D. C. Meyer, A. Vyalikh: **Operando NMR studies of electrochemical systems**, Modern Development of Magnetic Resonance, Kasan, Russland, 31.10.–04.11.2016, Vortrag
- V. Garbe, J. Weise, M. Motylenko, W. Münchgesang, A. Schmid, D. Rafaja, B. Abendroth, D. C. Meyer: **Au-free Ohmic Ti/Al/TiN Contacts to n-GaN**, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN), Orlando (USA/Florida), 2.–7. Oktober 2016, Poster PS2.94
- A. Vyalikh: **Solid-State NMR in Materials Science: Principles and Applications**, Electronic Structure, Magnetism and Dynamics Seminar, ESRF, Grenoble, Frankreich, 23.09.2016, Vortrag
- F. Meutzner, T. Nestler, A. A. Kabanov, M. Zschornak, W. Münchgesang, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Can we find aluminium ion conductors? Theoretical Models for the analysis of crystalline solid electrolytes**, 2<sup>nd</sup> Meeting of the Young Crystallographers of the DGK, Berlin, 21.–23. September 2016, Vortrag und Poster
- W. Münchgesang, D. Wagner, M. Motylenko, U. Langklotz, T. Nestler, A. Vyalikh, F. Meutzner, A. Rost, J. Schilm, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. Rafaja, D. C. Meyer: **Crystal structure, microstructure and ionic conductivity of the cost-efficient sodium solid electrolyte Na<sub>5</sub>YSi<sub>4</sub>O<sub>12</sub>**, 30<sup>th</sup> European Crystallographic Meeting, Basel, Schweiz, 28.08.–01.09.2016, Poster MS19-P9
- F. Meutzner, T. Nestler, A. A. Kabanov, M. Zschornak, W. Münchgesang, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Can we predict Al ion conductors? A combination of crystallographic and energetic evaluation tools**, 30<sup>th</sup> European Crystallographic Meeting, Basel, Schweiz, 28.08.–01.09.2016, Poster MS19-P14
- T. Nestler, F. Meutzner, A. A. Kabanov, M. Zschornak, S. Fedotov, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Are there solid electrolytes for rechargeable aluminium batteries?**, 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Den Haag, Niederlande, 21.–26. August 2016, Vortrag
- E. Mehner, B. Khanbabaee, C. Richter, J. Hanzig, M. Zschornak, U. Pietsch, H. Stöcker, T. Leisegang, D. C. Meyer, S. Gorfman: **Field-stabilized piezoelectricity in SrTiO<sub>3</sub> revealed by stroboscopic X-ray diffraction**, Joint ISAF/ECAPD/PFM Conference, Darmstadt, 21.–25. August 2016, Vortrag
- S. Jachalke, P. Hofmann, G. Leibiger, F. S. Habel, E. Mehner, T. Leisegang, D. C. Meyer, T. Mikolajick: **The pyroelectric coefficient of free standing GaN grown by HVPE**, Joint ISAF/ECAPD/PFM Conference, Darmstadt, 21.–25. August 2016, Vortrag
- T. Nestler, F. Meutzner, A. A. Kabanov, M. Zschornak, S. Fedotov, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Are there solid electrolytes for Al<sup>3+</sup>?**, 12<sup>th</sup> International Symposium on Systems with Fast Ionic Transport, Kaunas, Litauen, 3.–7. Juli 2016, Vortrag

- V. Vizgalov, T. Zakharchenko, D. M. Itkis, W. Münchgesang, M. Motylenko, D. C. Meyer, A. Vyalikh: **Solid State NMR for the Study of Battery Materials**, Developments and Applications of Solid State NMR to Materials Science, Chemistry and Engineering Conference, Varna, Bulgarien, 14.–17. Mai 2016, Vortrag
- T. Köhler, E. Mehner, J. Hanzig, G. Gärtner, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Kinetics of the hydrogen defect in lithium niobate and lithium tantalate**, 24. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Stuttgart, 14.–17. März 2016, Poster P165
- T. Leisegang, F. Meutzner, T. Nestler, M. Zschornak, A. A. Kabanov, W. Münchgesang, R. Schmid, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Crystalline solid electrolytes for all-solid-state batteries – complexity, conductivity, crystallography**, 24. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Stuttgart, 14.–17. März 2016, Vortrag MS08-04
- F. Meutzner, T. Nestler, A. A. Kabanov, M. Zschornak, W. Münchgesang, T. Leisegang, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **Crystallographic and energetic evaluation tools for the prediction of ionic conduction of Al in oxides**, 24. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Stuttgart, 14.–17. März 2016, Vortrag MS04-14 und Poster P080
- M. Nentwich, M. Zschornak, M. Sonntag, D. C. Meyer: **Structure Review of the  $R_2TSi_3$  family**, 24. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Stuttgart, 14.–17. März 2016, Poster P145
- M. Sonntag, E. Mehner, H. Stöcker, B. Störr, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Dye degradation catalyzed by piezoelectric materials**, 24. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Stuttgart, 14.–17. März 2016, Poster P149
- M. Zschornak, J. Hanzig, E. Mehner, F. Hanzig, W. Münchgesang, T. Leisegang, H. Stöcker, D. C. Meyer: **Anisotropy of Oxygen Vacancy Migration in  $SrTiO_3$** , 24. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie, Stuttgart, 14.–17. März 2016, Vortrag MS19-03
- V. Garbe, J. Walter, W. Münchgesang, A. Schmid, R. Otto, T. Behm, B. Abendroth, D. C. Meyer: **Ohmic Ti/Al/TiN Contacts to n-GaN Fabricated by Sputter Deposition**, 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Regensburg, 6.–11. März 2016, Poster HL 35.36
- S. Jachalke, E. Mehner, H. Stöcker, E. Schleicher, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Compositional influence on the pyroelectric coefficient of  $(1-x)PMN-xPT$** , 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Regensburg, 6.–11. März 2016, Poster KR 1.2
- W. Münchgesang, A. Vyalikh, F. Meutzner, T. Nestler, D. Wagner, A. Rost, U. Langklotz, J. Schilm, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Investigation of the sodium solid electrolyte  $Na_5YSi_4O_{12}$** , 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Regensburg, 6.–11. März 2016, Vortrag KR 4.2
- M. Stöber, C. Cherkouk, J. Walter, M. Schelter, J. Zosel, R. Strohmeyer, S. Prucnal, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Implanted Strontium Titanate Single Crystals for Energy Storage Applications**, 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Regensburg, 6.–11. März 2016, Vortrag DF 13.7

## Biomaterialogie und Extreme Biomimetik

- I. Petrenko, V. V. Bazhenov, H. Ehrlich, V. Z. Kutsova: **Full Metal Chitinous Jacket, or Novel Approach to Metalize 3D Chitin Matrices**, Bio-inspired Materials 2016, International School and Conference on Biological Materials Science, 22.–25.02.2016, Potsdam, Vortrag
- T. Jesionowski, M. Wysokowski, T. Szatkowski, H. Ehrlich: **Organic templates of poriferan origin for bioinspired hydrothermal synthesis of advanced biocomposites**, 24<sup>th</sup> Annual Forum on Advanced Materials – Polychar, 09.–13.05.2016, Poznan, Polen, Vortrag
- H. Ehrlich: **Extreme Biomimetics and Development of Novel Advanced Nanomaterials**, NanoTech Poland International Conference & Exhibition, 22.–25.06.2016, Poznan, Polen, Keynote Vortrag
- M. Wysokowski, T. Szatkowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Extreme biomimetic approach for synthesis of nanocrystalline chitin-(Ti,Zr)O<sub>2</sub> multiphase composites**, NanoTech Poland International Conference & Exhibition, 22.–25.06.2016, Poznan, Polen, Vortrag
- T. Szatkowski, M. Wysokowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Fibrous skeleton of marine demosponge (*Hippospongia communis*) as a 3d cellular matrix for inorganic compounds**, NanoTech Poland International Conference & Exhibition, 22.–25.06.2016, Poznan, Polen, Vortrag
- H. Ehrlich: **The impact of sucrose pretreatment on survival of mesenchymal stromal cells, cryopreserved in suspension and adherent state**, CRYO2016: The 53<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Society for Cryobiology, 24.–27.07.2016, Ottawa, Kanada, Vortrag
- M. Wysokowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Extreme Biomimetics on the Service of Bio-Inspired Materials Science**, 3<sup>rd</sup> International Conference on Bio-based Polymers and Composites, 28.08.–01.09.2016, Szeged, Ungarn, Vortrag
- H. Ehrlich: **Chitinous scaffolds of Poriferan origin: discovery, applications and future**, 7<sup>th</sup> Symposium for Industrial Cell Technology, 08.–09.09.2016, Lübeck, Keynote Vortrag
- B. Michalska, M. Wysokowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich: **Synthesis of silica-chitin nanocomposite via spray drying**, XXII Conference of The Polish Chitin Society, 14.–16.09.2016, Marienburg, Polen, Vortrag
- H. Ehrlich: **Chitin of Poriferan origin: discovery, practical applications and future**, 11<sup>th</sup> Asia Pacific Chitin and Chitosan Symposium & 5<sup>th</sup> Indian Chitin and Chitosan Society Symposium, 28.–30.09.2016, Kochi, Kerala, Indien, Keynote Vortrag
- I. Petrenko, V. V. Bazhenov, H. Ehrlich, V. Z. Kutsova: **Functionalization & modification of biomatrix by nano metallization**, 11<sup>th</sup> Asia Pacific Chitin and Chitosan Symposium & 5<sup>th</sup> Indian Chitin and Chitosan Society Symposium, 28.–30.09.2016, Kochi, Kerala, Indien, Vortrag

## Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

- S. Molodtsov: **New opportunities for PES of condensed matter using FELs**, School on Synchrotron and FEL Based Methods: Multi-Disciplinary Applications and Perspectives, 4.–5. April 2016, Trieste, Italien, Vortrag
- S. Molodtsov: **European XFEL: Unique possibilities for X-ray spectrometry research**, European Conference on X-Ray Spectrometry EXRS2016, 19.–24. Juni 2016, Gothenburg, Schweden, Vortrag
- S. Molodtsov: **European XFEL: Status and research instrumentation**, Laser Optics 2016, 27. Juni – 1. Juli 2016, St. Petersburg, Russland, Vortrag
- S. Molodtsov: **European XFEL – novel tool for study ultrafast magnetic phenomena**, Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” EASTMAG-2016, 15.–19. August 2016, Krasnoyarsk, Russland, Vortrag
- S. Molodtsov: **SR and FEL X-ray sources**, RACIRI Summer School 2016 “Time-resolved and In-situ Studies of Materials: Basics and Applications”, 21.–28. August 2016, Repino, Russland, Vortrag
- S. Molodtsov: **European XFEL: Status and early user experiments**, Turkish Physical Society 11<sup>th</sup> Internationally Participated Summer School on Particle Accelerators and Detectors UPHDYO-XI, 31. August – 4. September 2016, Bodrum, Türkei, Vortrag
- S. Molodtsov: **European XFEL: Unique possibilities for multidimensional research**, Symposium “Future Possible Use of Neutron and Synchrotron Sources by the Austrian User Community”, 15.–16. September, 2016, Graz, Österreich, Vortrag
- S. Molodtsov: **European XFEL – novel tool for nanomaterials research and characterization**, 2<sup>nd</sup> International Conference “Science of the Future”, 20.–23. September 2016, Kazan, Russland, Vortrag
- S. Molodtsov: **Progress and perspectives in photoemission using XFEL radiation**, 63<sup>rd</sup> Annual AVS International Symposium, 6.–11. November 2016, Nashville, Tennessee, USA, Vortrag
- F. Roth: **Observation of the dynamics of charge separation at donor/acceptor interfaces in organic photovoltaics**, 39<sup>th</sup> International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics, 3.–8. Juli 2016, Zürich, Schweiz, Vortrag

## Juniorprofessur Kristallphysik

- R. Gumeniuk, W. Schnelle, M. Ahmida, M. Abd-Elmeguid, K. Kvashnina, A. Tsirlin, A. Leithe-Jasper, C. Geibel: **Valence fluctuations in the boride  $\text{Eu}_4\text{Pd}_{29+x}\text{B}_8$** , 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Regensburg, 6.–11. März 2016, Vortrag TT 43.5
- M. Gamza, R. Gumeniuk, W. Schnelle, U. Burkhardt, A. Slebarski, H. Rosner: **Coexistence of magnetic order and valence fluctuations in a heavy fermion system  $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Sn}_5$** , 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Regensburg, 6.–11. März 2016, Vortrag TT 43.6
- R. Gumeniuk, W. Schnelle, A. Leithe-Jasper: **Crystal structure and physical properties of  $\text{ThPt}_{3+x}\text{Be}$** , 46<sup>èmes</sup> Journées des Actinides (JdA 2016), Alpe d'Huez, Frankreich, 16.–20. März 2016, Poster P5
- A. Amon, L. Akselrud, M. Bobnar, M. Avdeev, R. Gumeniuk, A. Leithe-Jasper, Ju. Grin: **A New Superconducting Beryllium Platinide**, 18. Vortragstagung der GDCh-Fachgruppe Festkörperchemie und Materialforschung, Innsbruck, Österreich, 19.–21. September 2016, Vortrag
- R. Gumeniuk, I. Veremchuk, W. Schnelle, M. Bobnar, T. Weigel, T. Leisegang, A. Leithe-Jasper: **Thermoelectric properties of some sulphides with mineral-related crystal structures**, 14<sup>th</sup> European Conference on Thermoelectrics (ECT 2016), Lissabon, Portugal, 20.–23. September 2016, Poster PA9.5
- F. Biedermann, R. Janot, R. Hüttl, J. Seidel, R. Gumeniuk, F. Mertens: **Heat capacity measurement of LiSi in a temperature range 2–730 K**, MSE Materials Science and Engineering (MSE 2016), Darmstadt, 27.–29. September 2016, Vortrag A02.3



## Graduierungen und studentische Arbeiten

### Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

- Marcus Schauer: **Das Potential von Silizium in modernen Energiespeichersystemen**, Forschungsbezogenes Projektseminar, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Richard Wolowski: **Aluminium – Kandidat für Energiespeicher höchster Energiedichten?**, Forschungsbezogenes Projektseminar, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Rebekka Rehwald: **Beeinflussung der Versetzungsdichte von einkristallinem Strontiumtitanat (100) durch Temperung unter reduzierenden und oxidierenden Bedingungen**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Lukas Hell: **Atomlagenabscheidung von  $ZrO_2$  aus TEMAZ und  $H_2O$  – Prozessoptimierung und Schichtcharakterisierung**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Manuel Rothenberger: **Pyroelektrische Wasserstoffherzeugung: Praktischer Test und Kalibrierung eines Demonstrators**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Juliane Erdmann: **Ternäre Atomlagenabscheidung von Al-dotierten  $TiO_2$ -Isolatorschichten und Untersuchung des Einflusses des Al-Gehaltes auf die Struktur und das resistive Schaltverhalten**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Mandy Koitzsch: **Untersuchungen zur antimikrobiellen Wirksamkeit von  $LiNbO_3$  und  $BaTiO_3$** , Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Anja Lehmann: **Untersuchungen zur Pyroelektrizität quasiamorpher Strontiumtitanat-Schichten**, Diplomarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Rocco Liebschner: **Optimierung und Charakterisierung von  $(Ba,Ca)(Zr,Ti)O_3$ -Dünnschichten für elektrokalendarische Anwendungen**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Rebekka Rehwald: **Einfluss der Kornstruktur vom mc-Silizium auf die elektrischen Eigenschaften**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, Fraunhofer THM, 2016
- Tina Weigel: **Elektronendichteanalyse von pyroelektrischem  $LiMO_3$  – Röntgeneinkristalldiffraktometrie und Ab-initio-Modellierung**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Juliane Hanzig:  **$SrTiO_3$  unter Einfluss von Temperatur und elektrischem Feld**, Doktorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016

## **Biomineralogie und Extreme Biomimetik**

- Christina Klinger: **Isolierung von Chitin aus marinen Schwämmen mittels neuer physikalischer Methoden**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016
- Diana Nebrich: **Entwicklung von Hydrogelen aus Chitin und deren Komposit-Derivaten**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2016

## **Photovoltaik**

- Christian Look: **Charakterisierung von Sageslurries mit Hilfe von Benetzungsversuchen**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, Fraunhofer THM, 2016

## 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: [tu-freiberg.de/exphys](http://tu-freiberg.de/exphys)

### Redaktion

Dr. Hartmut Stöcker, Institut für Experimentelle Physik

### Druck

Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg

### ISSN

2567-157X

### Copyright

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

### Danksagung

Die Redaktion dankt allen Autoren, die mit Texten und Bildern zu diesem Bericht beigetragen haben (siehe nächste Seite) und insbesondere Dr. Tilmann Leisegang für das Lektorat.

### Titelbild

*In-situ*-Vakuumkammer für die gleichzeitige Messung elektrischer Eigenschaften bei Temperaturen zwischen  $-180\text{ °C}$  und  $+1000\text{ °C}$  und die strukturelle Charakterisierung mit Synchrotronstrahlung, © Sven Jachalke.

## Autoren

- 1 Dirk C. Meyer
- 5–12 Hartmut Stöcker
- 15–20 Dirk C. Meyer, Hartmut Stöcker,  
Tilmann Leisegang
- 21–24 Hermann Ehrlich, Sabine Kaiser
- 25–32 Serguei Molodtsov, Friedrich Roth
- 34–35 Roman Gumeniuk, Pawel Wyzga,  
Barbara Abendroth, Andreas Leithe-Jasper
- 36–37 Barbara Abendroth
- 38–48 Falk Meutzner, Tilmann Leisegang
- 49–51 Tilmann Leisegang, Tina Nestler,  
Falk Meutzner, Robert Schmid
- 52–53 Anastasia Vyalikh, Wolfram Münchgesang
- 54–56 Tilmann Leisegang, Wolfram Münchgesang
- 57–59 Tilmann Leisegang, Hartmut Stöcker,  
Robert Schmid, Mateo Ureña de Vivanco
- 60–61 Thomas Köhler
- 62–63 Hartmut Stöcker, Christoph Reuther
- 64–65 Valentin Garbe
- 66–67 Matthias Zschornak
- 68–72 Dirk C. Meyer, Theresa Lemser
- 75 Mateo Ureña de Vivanco
- 76–77 Melanie Nentwich
- 78–79 Alena Raatz, Falk Meutzner
- 80 Melanie Nentwich, Khai-Nghi Truong
- 81 Hartmut Bergelt

## Bildquellen

- 1 Medienzentrum
- 5–10 Sven Jachalke
- 11 Claudia Funke, Thomas Behm
- 12 Sven Jachalke
- 20 Robert Schmid, Erik Mehner
- 21 Iaroslav Petrenko, Springer Verlag
- 22 Claudia Funke, Thomas Behm,  
Vasilii Bazhenov, Iaroslav Petrenko
- 24 Vasilii Bazhenov
- 25 European XFEL GmbH, Sven Jachalke
- 26 Friedrich Roth
- 27 Valentin Garbe
- 28–32 Friedrich Roth, European XFEL GmbH
- 34–35 Roman Gumeniuk
- 37 Barbara Abendroth, Sven Jachalke
- 38 Tina Weigel, Claudia Funke, Thomas Behm
- 39 Sven Jachalke
- 40 Falk Meutzner
- 41 Sven Jachalke
- 46 Falk Meutzner
- 47 Falk Meutzner, Matthias Zschornak
- 48 Sven Jachalke
- 50 Tilmann Leisegang
- 51 Sven Jachalke
- 52–53 Anastasia Vyalikh, Wolfram Münchgesang
- 54–55 Wolfram Münchgesang, Sven Jachalke
- 57 Tilmann Leisegang
- 58 Sven Jachalke
- 59 Robert Schmid
- 60 Sven Jachalke
- 62 Hartmut Stöcker
- 63 Christoph Reuther
- 64–65 Valentin Garbe
- 66 Carsten Richter
- 67 DESY
- 69 Cinector GmbH
- 70 Medienzentrum
- 71–72 Heinle, Wischer und Partner
- 76–77 Melanie Nentwich
- 78–79 Alena Raatz
- 80 Michael Gaultois
- 81 Hartmut Bergelt

