



Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

für den vorliegenden Jahresbericht 2020 des Instituts für Experimentelle Physik (IEP) steht mein herzlicher Dank für die durch alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter geleistete Arbeit an erster Stelle.

Im Ergebnis des Berichtszeitraums können wir erneut auf gemeinsam erzielte Erfolge in Forschung und Lehre und einen weiteren Ausbau der wissenschaftlichen Ausstrahlung und die Konsolidierung der erreichten Positionierung des IEP blicken. Besonders erfreulich ist nach längerer „Bewährungsphase“ die Berufung von Prof. Dr. Roman Gumeniuk auf die W2-Professur für Kristallphysik.

Im Jahr 2020 wurden wieder zahlreiche Abschlüsse in verschiedenen Stufen der fachlich-wissenschaftlichen Qualifikation erreicht, was nicht zuletzt durch intensive Betreuungsleistungen ermöglicht wurde. Auch für das außerordentliche Engagement in allen Bereichen der Lehre und Selbstverwaltung möchte ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danken, waren doch aus gegebenem Anlass besondere Herausforderungen zu meistern. Diesbezüglich fühle ich mich insbesondere für die im Zusammenhang erforderlich gewordenen Online-Lehrangebote verbunden.

Neben der aktiven Teilnahme an internationalen Fachkonferenzen und weiteren einschlägigen Veranstaltungen trugen auch in diesem Jahr unsere Publikationsaktivitäten in wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie durch eingeladene Buchbeiträge zur Sichtbarkeit des IEP und der gesamten Universität bei. Ein besonderer Höhepunkt war sicherlich die Verleihung des Max-von-Laue-Preises der

Deutschen Gesellschaft für Kristallographie (DGK) an Dr. Matthias Zschornak in Anerkennung seiner methodischen Weiterentwicklung der resonanten Röntgenstreuung zur Sichtbarmachung von Orbitalen und seiner Arbeiten zur Defektmigration und -separation in Oxiden unter Einfluss externer Felder auf dem *Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020* in Breslau. Ausdrücklich freuen durften wir uns ebenso über die Zuerkennung des DAAD-Preises für internationale Studierende an unseren Absolventen im Studiengang Angewandte Naturwissenschaft M. Sc. Amir Mohammad, der unserem Institut im Rahmen eines Promotionsvorhabens weiterhin verbunden ist.

Die Ergebnisse der kreativen und intensiven Arbeit waren zugleich Grundlage für die Einwerbung von Projektmitteln, die uns den Erhalt und weiteren Ausbau unserer Kompetenzen sowie auch die Umsetzung des Humboldtschen Prinzips der Einheit von Forschung und Lehre ermöglichen. Nachdem das BMBF-Vorhaben *R2R-Battery* noch einmal verlängert wurde, wuchs parallel dazu das BMWi-Vorhaben „Die Aluminiumbatterie: Herausforderungen für die industrielle Fertigung – ProBaSol“ auf. Beide Vorhaben werden hier erwähnt, da sie insbesondere im Bereich der Geräteinfrastruktur einen maßgeblichen Aufbau möglich machen. Hinzu möchte ich zahlreiche DFG-Vorhaben im Einzelverfahren sowie ZIM-Projekte ohne Ausschluss weiterer Säulen nennen. Damit wird deutlich, dass es uns gelingt, den Bogen von der Grundlagenforschung bis hin zu industriellen Anwendungen zu spannen.

Unser langjähriges Engagement an internationalen Großforschungseinrichtungen wurde in bewährter Weise fortgeführt. Dies, wie alle weiterhin erwähnten Aktivitäten, kann sich auf professionelle technische Unterstützung durch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Bereich der Werkstätten, der chemischen Laboratorien und der IT abstützen.

Seit der Anfangsphase der Antragstellung des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) im Jahr 2013 und dem Baubeginn im Jahr 2016 habe ich in meiner Eigenschaft als Wissenschaftlicher Sprecher des ZeHS für dessen Aufbau zahlreiche Anleihen an bewährte Gedanken des IEP in diese Richtung transportiert und initiativ auch unsere Ressourcen eingesetzt. Nun sind nach der Übergabe im Jahr 2021 dem IEP zugeordnete Laboratorien und mehrere Forschungsgroßgeräte am ZeHS arbeitsfähig. Damit erhielt das IEP weitere Forschungsmöglichkeiten und insgesamt einen beachtlichen Zuwachs. Eine aus *R2R-Battery* finanzierte industriekalige Anlage zur Schichtherstellung und -modifizierung Rolle-zu-Rolle auf Grundlage elektrothermischer Prozesse kam am ZeHS zur Aufstellung. Die Beschäftigung mit flexiblen Stromtarifen im Rahmen eines umfassenden Energiemonitoring und -managementsystems erweitern

das Spektrum unserer bisherigen Arbeitsschwerpunkte im aktuellen gesamtwirtschaftlichen Kontext.

Auch in diesem Zusammenhang bin ich allen involvierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihren weit-sichtigen und engagierten Einsatz zum Nutzen unseres Hauses sowie der gesamten Universität sehr dankbar.

Allen Partnern des IEP bin ich sehr verbunden und freue mich auf die weitere Zusammenarbeit im Jahr 2021 und natürlich darüber hinaus sowie auf neue Gelegenheiten gemeinsam weitere Perspektiven ins Auge zu fassen. Für die vorliegende Publikation hat sich in bewährter Weise Dr. Hartmut Stöcker besonders verdient gemacht. Damit sollte Ihnen erneut eine ansprechende und durch die Aufsätze zahlreicher Beitragender interessante Lektüre vorliegen.

Schließlich verbleibe ich mit besten Grüßen und einem herzlichen Glückauf,



Direktor des IEP und Wissenschaftlicher Sprecher des ZeHS

---

## Das Institut für Experimentelle Physik

Das Institut	5
Die Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik	7
Geräte am Institut für Experimentelle Physik	8
Bearbeitete Stoffsysteme	10

---

## Arbeitsgruppen

Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ Prof. Dirk C. Meyer	13
Arbeitsgruppe „Kristallphysik“ Prof. Roman Gumeniuk	18
Arbeitsgruppe „Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“ Prof. Serguei Molodtsov	20
Arbeitsgruppe Energiematerialien	26
Freiberger Zentrum für Pyroelektrizität	34
Arbeitsgruppe Resonante Röntgenmethoden und Kristallmodellierung	36
Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung	38

---

## Projekte

Die Aluminiumbatterie: Herausforderungen für die industrielle Fertigung	47
Folienartige, ressourceneffiziente, gewebebasierte Stromkollektoren für Lithium-Ionen-Zellen	50
Kontrollierte Einstellung der Atomstruktur durch akustische Wellen und elektrische Felder	52
Resonante Röntgendiffraktion unter optimierter destruktiver Interferenz	56
Rolle-zu-Rolle-Fertigung neuartiger Post-Lithium-Energiespeicher	58

---

## Lehre

Das Physikalische Grundpraktikum unter Pandemiebedingungen	65
Die Digitalisierung der Übungen und Prüfungen	67
Physikauffrischung vor Studienbeginn	71
Angebotene Lehrmodule	72

---

## Publikationen

Wissenschaftliche Publikationen	75
Konferenzbeiträge	79
Graduierungen und studentische Arbeiten	81
Auszeichnungen	82

---

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 Energiewandlung und -speicherung. 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. Unter Leitung des Institutsdirektors Dirk C. Meyer befindet sich im Moment das Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung ZeHS im Bau. 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 der Blick von der Straße zum Haupteingang).

## Institut für Experimentelle Physik

### Anschrift

Institut für Experimentelle Physik  
TU Bergakademie Freiberg  
Leipziger Straße 23  
09599 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

Sandra Kuechler  
Tel.: 03731 39 2892  
Fax: 03731 39 4314  
sandra.kuechler@physik.tu-freiberg.de

### Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

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

### Kristallphysik

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

### Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

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

### Arbeitsgruppen

Energiematerialien /  
Energy Materials  
Dr. Tilmann Leisegang  
Tel.: 03731 39 3341  
tilmann.leisegang@physik.tu-freiberg.de

### Freiberger Zentrum für Pyroelektrizität

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

### Resonante Röntgenmethoden und Kristallmodellierung

Dr. Matthias Zschornak  
Tel.: 03731 39 3333  
matthias.zschornak@physik.tu-freiberg.de

### Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung

Prof. Dr. Dirk C. Meyer  
Tel.: 03731 39 2860  
dirk-carl.meyer@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 Irmer  
Tel.: 03731 39 2246  
christoph.irmmer@physik.tu-freiberg.de

### Physikalisches Praktikum

Manuel Feig  
Tel.: 03731 39 2248  
manuel.feig@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

### Vorlesungstechnik

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




---

## DIE MITARBEITER DES INSTITUTS FÜR EXPERIMENTELLE PHYSIK

**Mitarbeiter des IEP von links oben nach rechts unten:**

Dr. Barbara Abendroth, Manuel Feig, Uta Fischer, Sever Flipo, Dr. Claudia Funke, Dr. Günter Gärtner, Prof. Roman Gumeniuk, Dr. Juliane Hanzig, Christoph Irmer, Diana Karsch, Thomas Köhler, Sandra Küchler, Dr. Tilmann Leisegang, Theresa Lemser, Dr. Volodymyr Levitskyi, Prof. Dr. Ralf Lüdemann, Christian Ludt, Dr. Erik Mehner, Prof. Dr. Dirk Meyer, Amir Mohammad, Prof. Dr. Serguei Molodtsov, Tina Nestler, Hardik Patil, Dmitrii Potorochin, Dirk Prsa, Dr. Friedrich Roth, Stefanie Schmidt, Dr. Hartmut Stöcker, Tatjana Suworow, Dr. Mateo de Vivanco, Dr. Christian Wagner, Tina Weigel, Patrick Zill, Dr. Matthias Zschornak, Esteban Zuñiga Puelles



## GERÄTE AM INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE PHYSIK

### Beschichtung

- Edwards Auto 306, thermischer Verdampfer
- PVD Products Titan, Magnetronsputterquelle
- Rovak Sputter-Blitz-Anlage
- Rovak R2R-Beschichtungsanlage
- Savannah S100, *Atomic Layer Deposition*
- Savannah S200, *Atomic Layer Deposition*
- Senntech, Ätzcluster
- Quorum Technologies SC7620, *Mini Sputter Coater*

### Elektrische Messungen

- Advance Riko ZEM-3, temperaturabhängige Bestimmung von Seebeck-Koeffizient und Widerstand
- BioLogic BCS, Batterietester
- Doppelstrahl-Laser-Interferometer zur Messung piezoelektrischer Koeffizienten
- Gamry Interface 5000, Potentiostat
- Gamry Reference 600, Potentiostat
- Hall-Messplatz mit Kryostat
- Keithley 4200, Vierspitzenmessplatz
- Land CT2001A Batterietester
- Neware BTS CT-4008, Batteriezyklierer

- Polarisierungsaufbau bis 30 kV Spannung
- Pyroelektrischer Messplatz mit HV-Kammer
- Pyroelektrischer Messplatz mit UHV-Kammer
- Quantum Design PPMS DynaCool
- Sinton WCT 120, Lebensdauermessung
- Vierpunkt-Messung im REM/FIB inkl. EBIC

### Mikroskopie

- FEI Helios NanoLab 600i, Rasterelektronenmikroskop mit *Focussed Ion Beam*
- Hochgeschwindigkeitskamera pco 1200
- Leitz Ergolux AMC, Lichtmikroskop
- PIV-System, *Particle Image Velocimetry*
- Thermographiesystem VarioCAM basic
- Zeiss AxioTech, Lichtmikroskop
- Zeiss Jenapol, Polarisationsmikroskop

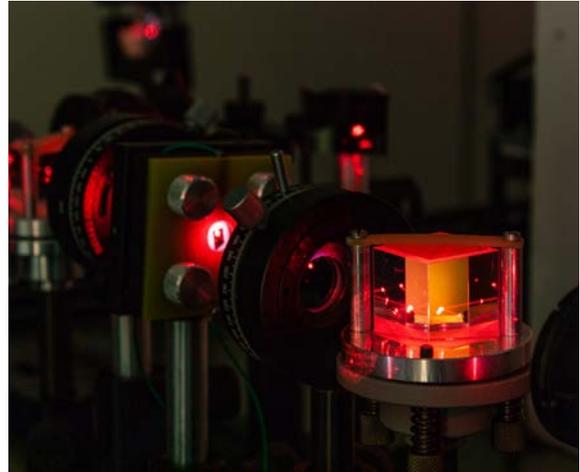
### Probenbehandlung

- Glovebox MBraun LABmaster dp
- Glovebox MBraun UniLab
- Glovebox Sylatech
- Struers Accutom-5, Präparationssäge

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

### Röntgendiffraktometrie

- Bruker D8 Advance, Dünnschichtdiffraktometer
- Bruker D8 Advance, Pulverdiffraktometer
- Bruker D8 Discover, Hochauflösungsdiffraktometer mit Hochtemperaturkammer
- Bruker D8 Discover, In-situ-Diffraktometer mit Drehanodenquelle
- Bruker D8 Quest, Einkristalldiffraktometer mit Tieftemperaturzusatz
- Philips X'Pert PW1830, Dünnschichtgerät



Strahlengang des Laserinterferometers

### Spektroskopie

- Bruker SI 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
- Memmert UF30Plus Trockenschrank
- Nabertherm LH 15/14, Kammerofen bis 1400 °C
- Xerion RO, Rohrofen bis 1100 °C
- Xerion Xtube, Dreizonenofen bis 1200 °C

### Topographie

- Olympus Lext, Konfokalmikroskop
- Tencor, mechanisches Profilometer
- UBM Microfocus Expert, Lasertopograph
- Veeco Multimode V, Rasterkraftmikroskop



Vorrichtung zum Verschließen von Kondensatorgehäusen



## BEARBEITETE STOFFSYSTEME

### Verbindungshalbleiter

- oxidische Halbleiter (z. B.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ) in Form von Einkristallen oder dünnen Schichten
- Oxide in Perowskitstruktur und verwandten Strukturtypen, z. B.  $\text{SrO}(\text{SrTiO}_3)_n$
- modulierte Strukturen, z. B.  $\text{Ho}_2\text{PdSi}_3$
- oxidische Pyroelektrika, z. B.  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$  und  $\text{LiTaO}_3$
- pyroelektrische Polymere, z. B. PVDF
- Galliumnitrid (GaN)

### Batteriematerialien

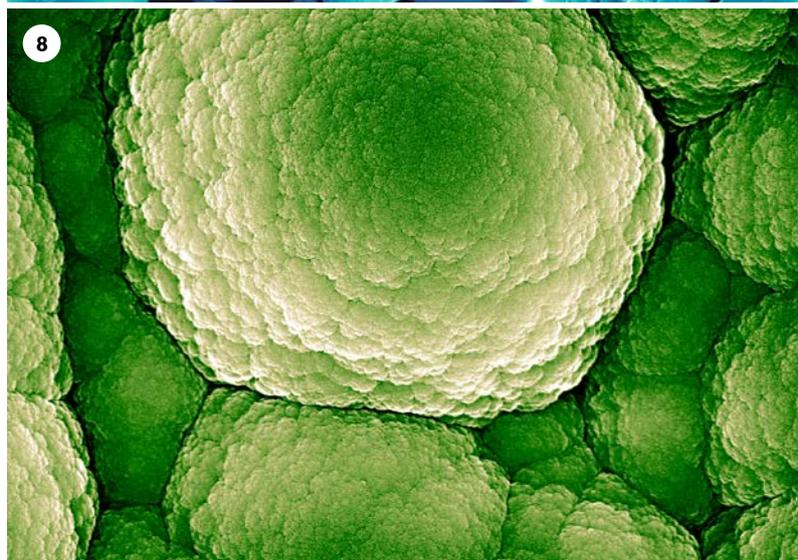
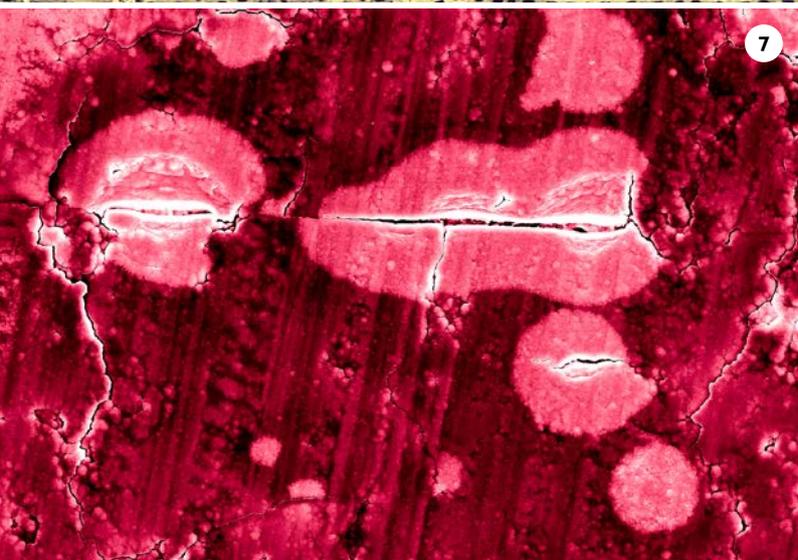
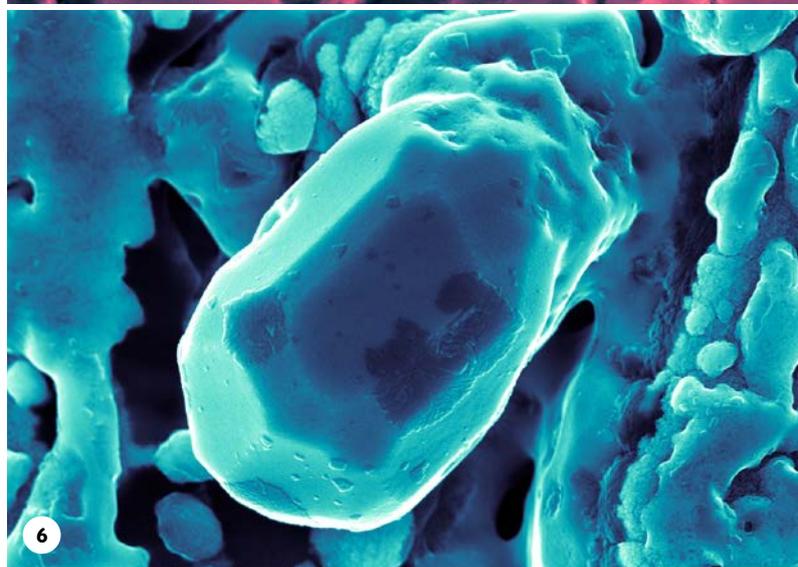
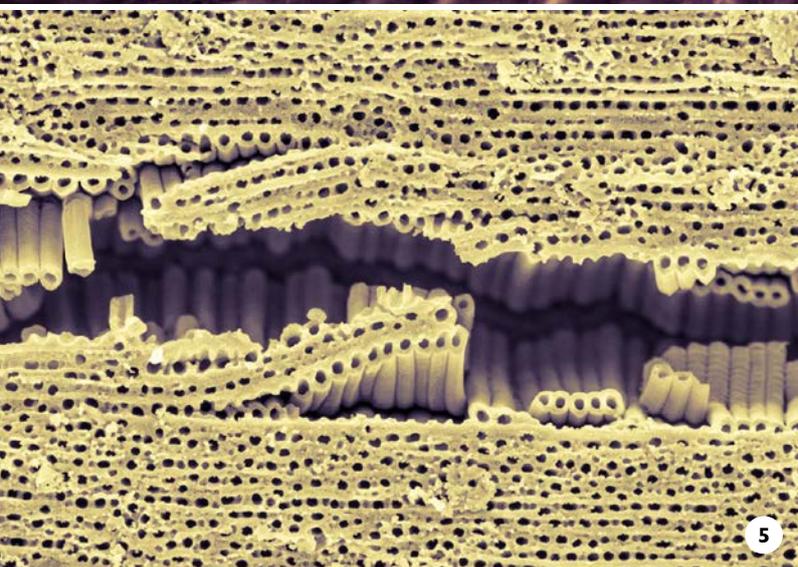
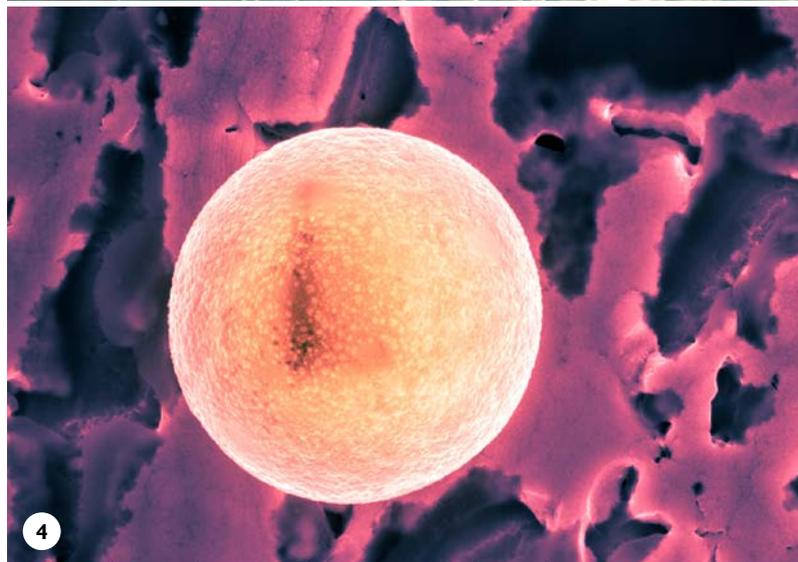
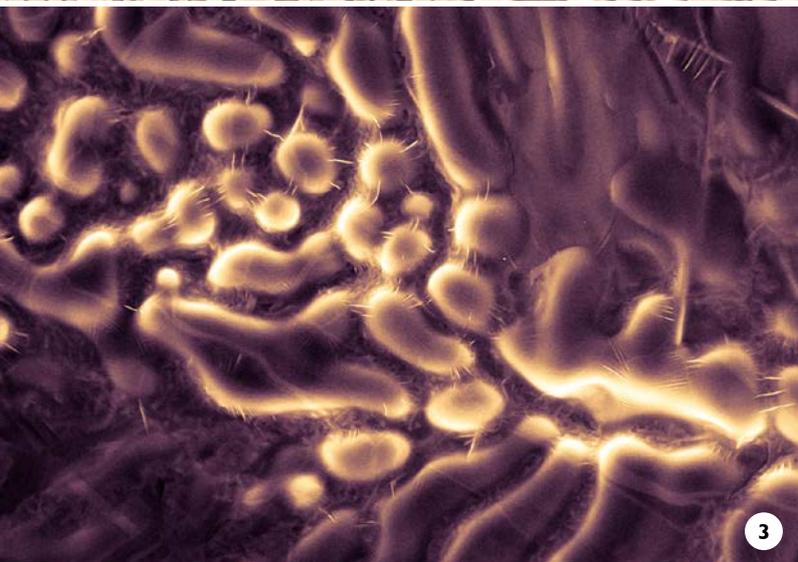
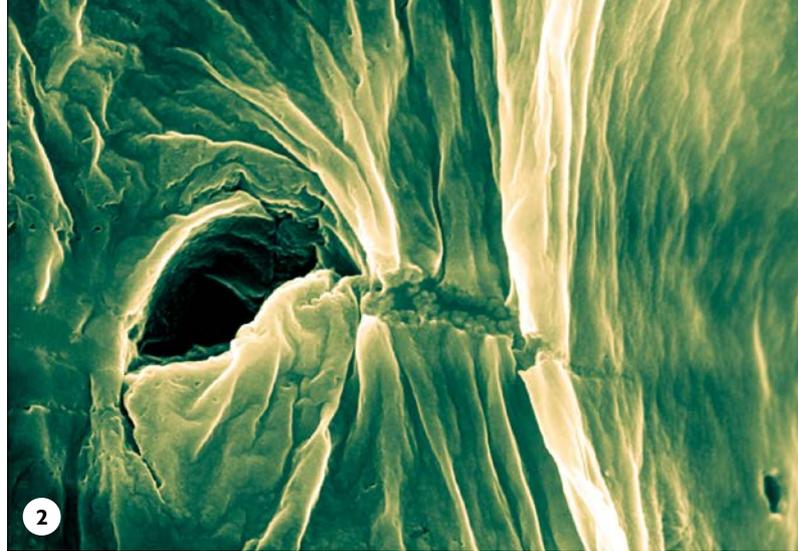
- Kathodenmaterialien: Al-, Li- und Na-basierte Systeme, u. a. Kohlenstoffnanoröhren
- Festelektrolyte: Al-, Li- und Na-Ionenleiter, Na-Y-Si-O-System,  $\beta$ -Aluminat, LAGP
- Anodenmaterialien: Al-, Li- und Na-Folien, Si-Verbindungen, Graphit

### 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 der rechten Seite:

- 1  $\text{MoO}_3$ -modifizierte  $\text{TiO}_2$ -Nanoröhren (100 000 $\times$ )
- 2 FLA-behandelte Silizium-Schicht auf Aluminium (80 000 $\times$ )
- 3 FLA-behandelte Silizium-Schicht auf Aluminium (6 500 $\times$ )
- 4 FLA-behandelte Silizium-Schicht auf Kupfer (20 000 $\times$ )
- 5  $\text{TiO}_2$ -Nanoröhren (50 000 $\times$ )
- 6 FLA-behandelte Silizium-Schicht auf Kupfer (35 000 $\times$ )
- 7 FLA-behandelte Silizium-Schicht auf Aluminium (2 000 $\times$ )
- 8 FLA-behandelte Silizium-Schicht auf Kupfer (40 000 $\times$ )



# ARBEITSGRUPPEN



---

## ARBEITSGRUPPE „VERBINDUNGSHALBLEITER UND FESTKÖRPERSPEKTROSKOPIE“ PROF. DIRK C. MEYER

Die Zielsetzung der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ folgt einem der wesentlichen Forschungsschwerpunkte der TU Bergakademie Freiberg und wurde hinsichtlich der zugeordneten Professur mit entsprechender thematischer Grundverankerung im Jahr 2009 durch Prof. Dirk C. Meyer neu besetzt. Für die Arbeit mit dem Schwerpunkt „Halbleitermaterialien“ steht als besondere Einheit seit dem Jahr 2008 das Zentrale Reinraumlabor der Bergakademie zur Verfügung. Es bietet verschiedenen Arbeitsgruppen aus den Bereichen Physik, Elektronik- und Sensormaterialien, Chemie und Werkstoffwissenschaft eine hervorragende Infrastruktur. Der seit der Übernahme der Professur vorangetriebene Ausbau der Infrastruktur des Instituts für Experimentelle Physik hinsichtlich vorrangig röntgenbasierter Analytik sowie der Elektronenmikroskopie erlaubt eine umfassende Charakterisierung der im Reinraumlabor prozessierten Funktionselemente. 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 intensiv 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. Seit etwa 10 Jahren 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 folgenden Partnern:

- Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen Freiberg,

- Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme Dresden,
- Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden,
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf,
- Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg,
- Bar-Ilan-Universität Ramat Gan (Israel),
- Lomonossow-Universität Moskau (Russland),
- *National University of Singapore*,
- *Samara Centre for Theoretical Materials Science* (Russland),
- *Tel Aviv University* (Israel),
- *Università degli Studi di Genova* (Italien).

In besonderem Umfang wird die Arbeitsgruppe für die Charakterisierung der Strukturbildung auch zukünftig die Synchrotronstrahlung an Großforschungszentren nutzen, wozu umfangreiche Erfahrungen existieren.

## 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 Anwendungsgebiete lagen dabei vorwiegend in 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. Die Arbeiten haben zahlreiche Evolutionssprünge durchlaufen; Voraussetzung dafür war, dass Herrn Prof. Dirk C. Meyer mehrere Schüler aus Dresden nach Freiberg folgten.

Nach einjähriger Wahrnehmung einer Vertretungsprofessur für „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ am IEP folgte Prof. Dirk C. Meyer im Jahr 2009 dem Ruf zur Übernahme dieser Professur und war sehr bald als Prorektor für Bildung und später als Prorektor für Strukturentwicklung der TU Bergakademie Freiberg tätig. 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 Synthese und Charakterisierung dünner Schichten stark ausgebaut. Als neue Methoden konnten so die *Atomic Layer Deposition* 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 Direktor des Instituts für Experimentelle Physik, seit 2013 auch Wissenschaftlicher Sprecher des Forschungsbaus „Zentrum für effiziente Hochtemperaturstoffwandlung“ (ZeHS), für dessen Antragstellung er federführend verantwortlich war und seither in diesem Sinne wirkt.

Die methodischen Kompetenzzentren und Schwerpunktsetzungen, zu denen im Folgenden berichtet wird, sind Bestandteil der Arbeitsgruppe. Das ZeHS hat hinsichtlich der Antragstellung im Wettbewerb und der Umsetzung im Bau maßgeblich von Erfahrungen und der Sichtbarkeit der Arbeitsgruppe profitiert.

## 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 technologischer Lösungen untersucht. Die bei Temperaturänderung auftretenden elektrischen Felder werden dabei nicht nur als Mess-, sondern auch 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 meist im Niedertemperaturbereich und damit als konventionell nicht nutzbare 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 pyroelektrischer Funktionsmaterialien.

Die Herausforderung bei der Polung und 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 und Schichten.

### Neuartige Energiespeichermaterialien

Mit der zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Sonne, Wasser, Wind und Geothermie wird die zeitliche Speicherung der erzeugten elektrischen Energie durch stationäre Speicher immer bedeutender. Diese werden eingesetzt, um sowohl das Überangebot elektrischer Energie, als auch deren Unterversorgung auf verschiedenen Zeitskalen von Millisekunden bis Wochen und Monaten abzufangen. Stationäre Speicher unterstützen die Frequenzregelung und dienen zur Verhinderung der Ausbreitung von Systemstörungen. Damit bieten sie zusätzliche Flexibilität bei der Verwaltung der elektrischen Energie, sichern den störungsfreien Betrieb des Stromnetzes ab, tragen letztlich zur Vermeidung wirtschaftlicher Kosten im Milliardenbereich durch Stromausfälle bei und minimieren die Verletzlichkeit moderner Gesellschaften.

Ein weiterer wichtiger, wenn nicht sogar der derzeit wichtigste Treiber für Innovationen im Energiespeicherbereich, ist die Absicht zum Austausch der mit einem Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeugflotte oder ihrer Ergänzung durch Elektrofahrzeuge (EV) in der nächsten Dekade. Deutsche und chinesische Autohersteller werden zusammen mehr als 90% der weltweiten Investitionen im Bereich der Elektromobilität tätigen. Zur Erhöhung der Marktakzeptanz von EV-Technologien sind die Senkung der Kosten von Energiespeichern und die Erhöhung der Reichweite der EV notwendig, was kontinuierliche Fortschritte in der Batterietechnologie erfordert.

Die Arbeiten am IEP zielen auf neue Batteriematerialkonzepte und auf die Identifizierung und Bewertung neuer Kathoden und Festelektrolyte für insbesondere Post-Lithium-Technologien auf Basis von Natrium- und Aluminium-Ionen. Damit soll durch das IEP zur Erweiterung und Verbesserung des grundlegenden Verständnisses zur Speicherung von Energie und zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energieträgern beigetragen werden. Seit dem Jahr 2012 wurden durch die Arbeitsgruppe am IEP mehr als drei Verbundforschungsvorhaben federführend bearbeitet und verstärkt durch weitere Einzelmaßnahmen flankiert. Zurückliegend wurden so eine breite Wissensbasis und Infrastruktur angelegt sowie erstmals eine sogenannte *All-in-one-all-solid-state*-Batterie vorgestellt und bereits Patente kommerzialisiert. Ferner wurde ein Buch mit dem Titel „*Electrochemical Storage Materials*“ im angesehenen Verlag De Gruyter herausgegeben und eine ähnlich lautende internationale Tagungsreihe „*International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials*“ (2013, 2015, 2017) etabliert.

### Strukturelle Modifizierung von Dielektrika

In der Arbeitsgruppe „Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie“ wird weiter intensiv an Oxiden mit Perowskitstruktur und damit verwandten Strukturtypen gearbeitet. Generell besteht auch 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 mit hoher Beweglichkeit bei Raumtemperatur große Bedeutung. Infolge ihrer Ladung können sie im umgebenden Kristallgitter durch Anlegen elektrischer Felder kontrolliert bewegt werden. Diese Umverteilung kann sogar zu Phasenumwandlungen führen, die einen Übergang aus einer zentrosymmetrischen in eine pyroelektrische Phase bedingen.

### 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 kernnahen Elektrons, wird ein Photon absorbiert und das Elektron aus dem Atomverband herausgelöst. Die an diesen spezifischen Photonenergien sprunghaft ansteigende Absorption wird als Kante bezeichnet. Röntgenographische Messungen in einem zweiten Kanal im Bereich der Absorptionskanten der zu untersuchenden Verbindungen werden als resonante Streuung bezeichnet. Diese

Methoden können meist nur an einem Synchrotron angewendet werden, da dort die Energie der Photonen aus einem weiten Bereich passend gewählt werden kann.

Eine Besonderheit resonanter Röntgenstreuung ist die verstärkte Abhängigkeit der Intensität eines Bragg-Reflexes von der Polarisierung der Röntgenstrahlung (der Ausrichtung der sie beschreibenden Feldvektoren). Ändert sich die Polarisierung der Photonen bezüglich des Wechselwirkungspartners – z. B. durch dessen Drehung – ergeben sich, abhängig von der Symmetrie des resonanten Atoms, charakteristische sinusförmige Oszillationen der Intensität. Diese Anisotropie kann in manchen Fällen dazu genutzt werden, Informationen auf atomarer Skala richtungsabhängig zu erhalten.

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 eingerichtete *Chemical Crystallography Beamline* ist 2018 in Betrieb gegangen. Die dabei entwickelte Kammer, welche u. a. auch temperaturabhängige Messungen ermöglicht, steht nun einem breiten Nutzerfeld zur Verfügung. Aufgrund der Personallunion des Leiters der Arbeitsgruppe, hier insbesondere mit seiner Eigenschaft als Wissenschaftlicher Sprecher des ZeHS, ergeben sich zusätzliche fachliche Synthesen und Potenziale für weitere Kooperationen mit Großforschungseinrichtungen, vorrangig auf den Gebieten der Nutzung von Synchrotron- und Neutronenstrahlung. Zu entsprechenden Industriepartnern bestehen aus bisherigen Kooperationen etablierte Kontakte hinsichtlich der Anwendung.



---

## ARBEITSGRUPPE „KRISTALLPHYSIK“ PROF. ROMAN GUMENIUK

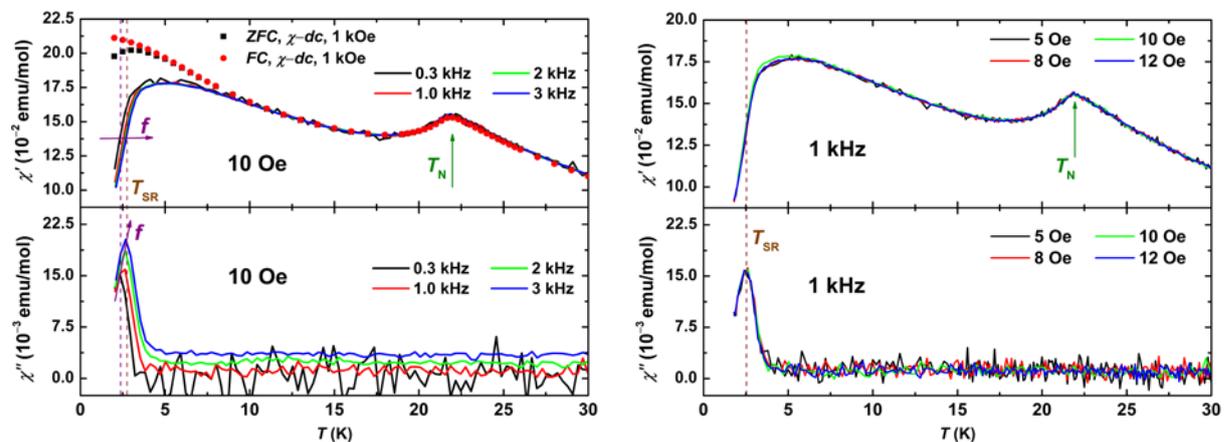
Die Erforschung von Materialeigenschaften bei tiefen Temperaturen war bisher kein wesentlicher Gegenstand des wissenschaftlichen Interesses an der TU Bergakademie Freiberg. Vor diesem Hintergrund stellt die Neuanschaffung eines kryogenfreien Systems zur Messung physikalischer Eigenschaften (PPMS DynaCool) an der Professur Kristallphysik des Instituts für Experimentelle Physik ein Novum an unserer Universität dar.

Das PPMS DynaCool von Quantum Design (QD) ist ein neuartiges System, welches auf Basis eines zweistufigen Pulsröhrenkühlers für das Temperaturregelungssystem und den supraleitenden Magneten physikalische Messungen zwischen 400 K und 1,9 K ermöglicht ohne die Notwendigkeit einer externen Versorgung mit verflüssigtem Stickstoff oder Helium. Das führt gegenüber herkömmlichen Systemen zu einer außerordentlichen Abnahme der Installationskosten sowie einer Reduzierung des Wartungsaufwandes. Für Messungen in Magnetfeldern können stufenlos bis zu 12 Tesla erreicht werden.

Verschiedene Optionen stehen zur Verfügung, welche die Messung diverser physikalischer Eigenschaften und damit umfangreiche Charakterisierungen der untersuchten

Materialien ermöglichen. Dazu zählen die magnetische Suszeptibilität, spezifische Wärme, sowie thermische (z. B. Wärmeleitfähigkeit, Seebeck-Effekt) und elektrische (z. B. elektrischer Widerstand, Hall-Effekt, Van der Pauw) Transporteigenschaften. Weiterhin stehen ein Rotator für winkelabhängige Messungen der elektrischen Eigenschaften sowie ein Helium-3-Kühler, welcher Messungen der elektrischen Eigenschaften und der spezifischen Wärme bis zu 0,35 K ermöglicht, zur Verfügung.

Ein wesentlicher Teil der Untersuchungen sind magnetische Ordnungsphänomene. Neben klassischen magnetischen Ordnungen, wie ferromagnetisch, antiferromagnetisch und ferrimagnetisch, sind auch mehrere nichttriviale magnetische Übergänge oder Strukturen bekannt. Dazu zählen helimagnetisches, metamagnetisches und superparamagnetisches Verhalten sowie Spinglas und die sogenannten Skyrmionen. Die metamagnetischen Spin-Flip- und Spin-Flop-Übergänge treten aus der Konkurrenz zwischen der magnetokristallinen Anisotropie (d. h. Vorhandensein einer leichten Magnetisierungsachse) und der Zeeman-Energie auf. Ordnet eine Probe trivial magnetisch, dann reicht normalerweise eine Messung



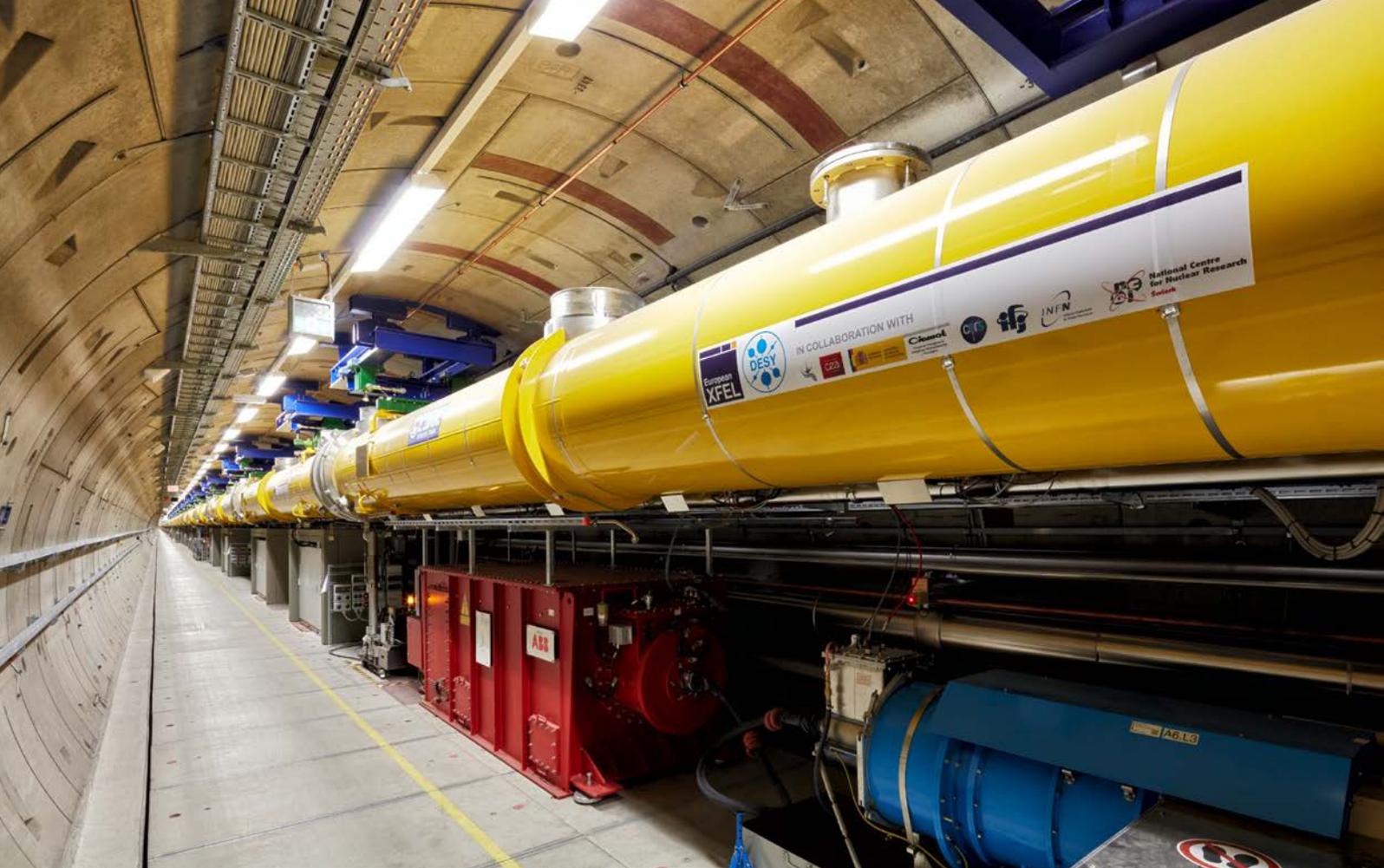
**Abbildung:** Links: Temperaturabhängigkeit der AC-Komponenten der magnetischen Suszeptibilität, gemessen bei 10 Oe Amplitude des treibenden Magnetfelds und Frequenzen wie angegeben. Die DC-Suszeptibilität ist zum Vergleich gezeigt. Rechts: Temperaturabhängigkeit der Komponenten der AC-Suszeptibilität gemessen mit unterschiedlichen Magnetfeldamplituden und einer Frequenz von 1 kHz.

der magnetischen DC-Suszeptibilität aus, um das Material allgemein zu charakterisieren. Gegenüber den nichttrivialen magnetischen Fluktuationen ist eine dynamische oder AC-Suszeptibilität am empfindlichsten. Das ist eine wichtige ergänzende Methode, die besonders für die Bestimmung von magnetischen Übergängen und Relaxationen nützlich ist. Um diese Untersuchungen durchführen zu können, ist zusätzlich zum vorhandenen vibrierenden Probenmagnetometer (VSM, für DC-Suszeptibilität) eine AC-Suszeptibilitätsoption (ACMS II) notwendig, welche von QD ausgeliehen wurde. Üblicherweise ist eine geringe Amplitude des Antriebsfeldes erforderlich, um den ungestörten Grundzustand des untersuchten Systems festzustellen. Der komplexe Wert der magnetischen AC Suszeptibilität besteht aus einem Realteil  $\chi'$  (hängt mit dem reversiblen Magnetisierungsprozess zusammen) und dem Imaginär-Teil  $\chi''$  (der für die energiedissipativen und irreversiblen Prozesse steht).

So haben z. B. unsere jüngsten Messungen der DC-Suszeptibilität an einer der Remeika-Phasen vom  $\text{Yb}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ -Strukturtyp gezeigt, dass die Verbindung bei  $T_N = 23,5$  K antiferromagnetisch ordnet. Allerdings zeigten die Messungen in Nullfeldkühl- und Feldkühlregimen eine Hysterese-ähnliche Aufspaltung der Kurven um die niedrigste erreichbare Temperatur von rund 2 K (siehe

Abbildung), was auf magnetische Anisotropie oder eine Spin-Umorientierung hindeutete (typische Effekte für antiferromagnetische Systeme). Dieser Befund veranlasste uns, Messungen der magnetischen AC Suszeptibilität durchzuführen. Durch Anwendung verschiedener treibender Feldamplituden und Frequenzen bestätigten wir den Übergang vom paramagnetischen zum antiferromagnetischen Zustand bei  $T_N = 23,5$  K, der gut mit DC- $\chi$  übereinstimmt (siehe Abbildung). Wie man sieht, ist  $T_N$  unabhängig von der angelegten Feldfrequenz und -amplitude, und die  $\chi''$ -Komponente um  $T_N$  zeigt keine Auswirkungen, was für die weitreichende antiferromagnetische Ordnung inhärent ist. Eine weitere Abkühlung verursacht drastische Änderungen sowohl der  $\chi'$ - als auch der  $\chi''$ -Komponenten der AC-Suszeptibilität. Darüber hinaus sind beide Effekte frequenzabhängig, was darauf hindeutet, dass die Spin-Umorientierung von antiferromagnetischer zu ferri- oder ferromagnetischer Phase ein Relaxationseffekt ist.

Mit der Anschaffung des PPMS DynaCool ergeben sich gänzlich neue Forschungsperspektiven an der TU Bergakademie Freiberg. In diesem Zusammenhang freuen wir uns auf die zukünftige Instituts- und Fakultäts-übergreifende Zusammenarbeit.



## ARBEITSGRUPPE „STRUKTURFORSCHUNG MIT XFELS UND SYNCHROTRONSTRAHLUNG“ PROF. SERGUEI MOLODTSOV

Die Arbeitsgruppe um Prof. Serguei Molodtsov, der die Position eines wissenschaftlichen Direktors am *European X-ray Free Electron Laser (EuXFEL, [www.xfel.eu](http://www.xfel.eu))* in Hamburg innehat, beschäftigt sich mit den verschiedenen spektroskopischen Methoden zur Materialuntersuchung unterschiedlichster Stoffsysteme, sowohl an der TU Bergakademie Freiberg als auch an anderen nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen. Vor allem die Anbindung sowie enge Kooperation mit dem EuXFEL (siehe Titelbild) ist hier besonders hervorzuheben. Seit 2017 ist der EuXFEL erfolgreich im Nutzerbetrieb und ermöglicht mit bis zu 27 000 Lichtblitzen pro Sekunde völlig neue Forschungsmöglichkeiten für Wissenschaftlerteams aus der ganzen Welt – wie auch aus Freiberg.

Von dieser neuen Forschungseinrichtung profitieren die unterschiedlichsten naturwissenschaftlichen Gebiete, darunter die im Ressourcenprofil der TU Bergakademie Freiberg verankerten Profillinien Geowissenschaft, Material/Werkstoffe, Energie und Umwelt. Neben der Spitzenforschung an weltweit einzigartigen Großgeräten

steht die Ausbildung von Studenten verschiedenster Fachrichtungen im Fokus der Aktivitäten der „Professur für Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“. Dies umfasst auf der einen Seite die unmittelbare Einbindung von Studenten in die Forschung, auf der anderen Seite die Vermittlung von Wissen in Form von Spezialvorlesungsreihen mit den Titeln: „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs)“ sowie „Spectroscopy: Synchrotron Radiation and its Applications“.

### Forschungstätigkeiten am Institut für Experimentelle Physik

Das Labor der Arbeitsgruppe am Institut für Experimentelle Physik ist mit einem modernen Photoemissionspektrometer – Thermo Scientific Escalab 250Xi (siehe Abbildung 1) – ausgestattet, das zur Untersuchung der elektronischen Struktur hochentwickelter Materialien geeignet ist. Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)

dient verschiedensten Fragestellungen innerhalb des IEP, insbesondere der Charakterisierung von Energiewandler- und Energiespeichermaterialien.

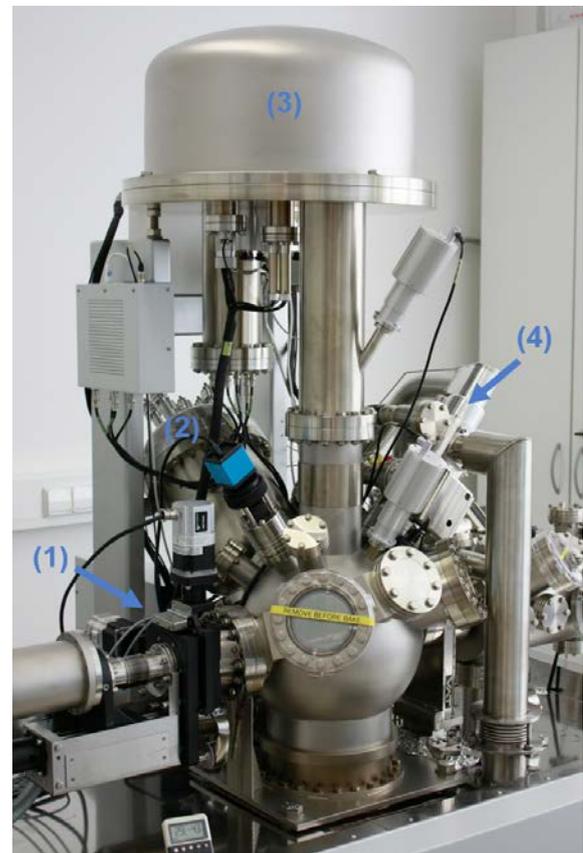
Weitere kontinuierliche Beziehungen gibt es zum Institut für Elektronik- und Sensormaterialien unter der Leitung von Prof. Yvonne Joseph, wo für grenzflächenbestimmte Funktionsmaterialien die Zusammensetzung dünner Filme analysiert wird, sowie zur Arbeitsgruppe „Biominerologie und Extreme Biomimetik“ von Prof. Hermann Ehrlich.

Darüber hinaus existieren auch Forschungskooperationen mit internationalen Partnern, wie zum Beispiel mit der Staatlichen Universität für Informationstechnologien, Mechanik und Optik St. Petersburg (*ITMO University*) in Russland.

Es ist hervorzuheben, dass diese Messapparatur sich im besonderen Maße zur Durchführung von Bachelor- und Masterarbeiten eignet. Damit kann sie direkt als Anwendung des während des Studiums angeeigneten Wissens auf Fragestellungen der aktuellen Forschung angesehen werden. Daten, die im Labor der „Professur für Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“ erhoben wurden, sind bereits in mehreren Publikationen in hochrangigen wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht worden.

Neben den bereits genannten Tätigkeitsfeldern ist die Professur Molodtsov direkt und maßgeblich am Aufbau eines neuen (Hochtemperatur-)Photoemissionsspektrometers (HT-PES) im Rahmen des Forschungsneubaus des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) in Freiberg beteiligt. Dieses neue Großgerät wird die bereits an der TU Bergakademie Freiberg vorhandenen spektroskopischen Möglichkeiten erweitern und zur Bündelung von vorhandenen Kompetenzen sowie instituts- und fakultätsübergreifenden Kooperationen genutzt werden. Wie von den Gutachtern der DFG hervorgehoben, besteht die Einzigartigkeit des neuen Spektrometers in der Kombination aus (Hochtemperatur-)XPS sowie hochauflösender (Tiefemperatur-)ARPES.

Ein solches Gerät ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht im Freistaat Sachsen vorhanden und stellt somit ein Alleinstellungsmerkmal dar, das die bereits am IEP vorhandene spektroskopischen Möglichkeiten vielversprechend erweitert. Im Sinne zukünftiger Vernetzungen unter Wissenschaftlern ist es besonders erfreulich, dass bereits unterschiedliche Institutionen u. a. die Technische



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

Universität Chemnitz, das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden, die Technische Universität Dresden sowie das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf schriftliches Kooperationsinteresse bekundet haben. Mit dem Schreiben vom 15.08.2019 der DFG wurde die Anschaffung des HT-PES-Spektrometers mit einem Volumen von 1.233.000 € zur Beschaffung empfohlen und wird nach aktueller Planung im Sommer 2021 im ZeHS installiert und in Betrieb genommen.

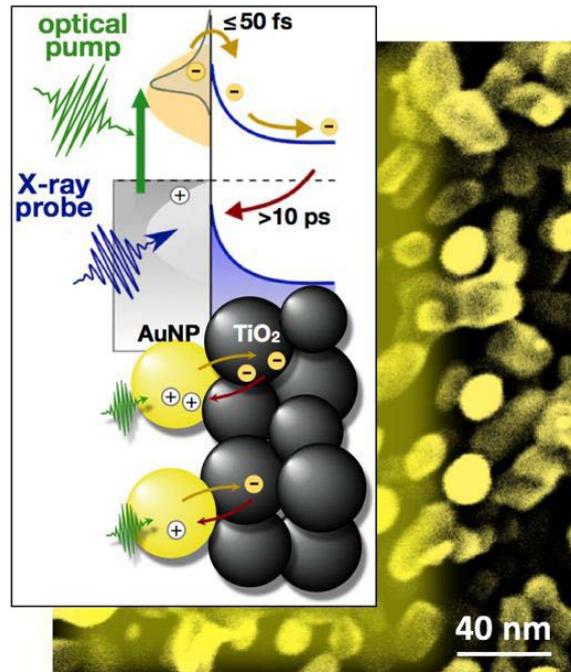
Der Fokus wird dabei zum einen auf Probencharakterisierungen mittels XPS bei hohen Temperaturen und zum anderen auf Untersuchungen der elektronischen Eigenschaften im Valenzbandbereich mittel UV-Photoelektronenspektroskopie (UPS) liegen. Des Weiteren wird mit dem neuen Spektrometer auch winkelaufgelöste Photoelektronenspektroskopie möglich sein, um die

Bandstruktur der untersuchten Materialien bestimmen zu können. So eröffnet das neue Spektrometer ganz neue Optionen und Perspektiven für die studentische Ausbildung.

## Nationale und internationale Forschungstätigkeiten

Seit 2014 besteht zwischen Herrn Dr. Friedrich Roth und Herrn Dr. Oliver Gessner, welcher das *Atomic, Molecular, and Optical Sciences (AMOS)* Programm am *Lawrence Berkeley National Laboratory* in Berkeley, CA leitet, eine sich stetig weiterentwickelnde und vertiefende Kooperation. Grundlage ist die Etablierung sowie 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, 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.

Auf der Suche nach sauberen Energiealternativen zu fossilen Brennstoffen beruht eine vielversprechende Lösung auf photoelektrochemischen (PEC) Zellen, welche Sonnenlicht und Wasser in solare Brennstoffe wie Wasserstoff umwandeln. In nur einem Jahrzehnt haben Forscher auf diesem Gebiet große Fortschritte bei der Entwicklung von PEC-Systemen erzielt. Dabei werden lichtabsorbierende Gold-Nanopartikeln – winzige Kugeln mit einem Durchmesser von nur einem Milliardstel Meter – an einer Halbleiterschicht aus Titandioxid-Nanopartikeln ( $\text{TiO}_2$  NP) aufgebracht. „Indem wir quantifizieren, wie die Elektronen ihre Arbeit auf der Nanoskala und in Echtzeit verrichten, kann unsere Studie dazu beitragen, zu erklären, warum einige wasserspaltende PEC-Geräte nicht so gut funktionierten wie erhofft“, sagt Oliver Gessner. Wenn Elektronen von den Gold-Nanopartikeln



**Abbildung 2:** Illustration eines PEC-Modellsystems mit 20 Nanometer großen Goldnanopartikeln, die an Titandioxid gebunden sind (© Berkeley Lab).

in den Titandioxid-Halbleiter übertragen werden, lassen sie „Löcher“ zurück. Die Kombination aus einem in das Titandioxid injizierten Elektron und dem Loch, das das Elektron zurückgelassen hat, wird als Elektron-Loch-Paar bezeichnet. Wenn man aber wissen will, wie gut ein plasmonisches PEC-Gerät funktioniert, muss man wissen, wie viele Elektronen sich von den Gold-Nanopartikeln zum Halbleiter bewegt haben, wie viele Elektronen-Loch-Paare gebildet werden und wie lange diese Elektronen-Loch-Paare vorhanden sind, bevor das Elektron zu einem Loch im Gold-Nanopartikel zurückkehrt. Je länger die Elektronen von den Löchern in den Gold-Nanopartikeln getrennt sind – also je länger die Lebensdauer der Elektronen-Loch-Paare ist – desto mehr Zeit hat man für die chemische Reaktion zur Herstellung von Kraftstoffen. Um diese Fragen zu beantworten, nutzte unsere Arbeitsgruppe in Kooperation mit Kollegen aus Berkeley eine Technik namens „Pikosekunden-zeitaufgelöster Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (TRXPS)“ an der *Advanced Light Source* des *Berkeley Labs*, um zu zählen, wie viele Elektronen zwischen den Gold-Nanopartikeln und dem



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

Titandioxid-Film übertragen werden, und um zu messen, wie lange die Elektronen im anderen Material bleiben (siehe Abbildung 2). Die Ergebnisse wurden im Fachjournal *Journal of Physical Chemistry Letters* veröffentlicht und können Forschern helfen, effizientere Materialkombinationen für das Design von Hochleistungs-Solartreibstoffgeräten zu entwickeln.

## Forschungs- und Bautätigkeiten am European XFEL

In der Metropolregion Hamburg ist in den letzten Jahren eine internationale Forschungseinrichtung der Superlative entstanden (siehe Abbildung 3 und 4). Der Röntgenlaser *European XFEL* erzeugt 27 000 Lichtblitze pro Sekunde, mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art. Damit eröffnet der EuXFEL 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.

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

Seit 2018 existiert eine bilaterale Kooperationsvereinbarung zwischen dem EuXFEL und der TU Bergakademie Freiberg, welche es Freiburger Studenten ermöglicht, ihre Master- und Bachelorarbeiten gemeinschaftlich in Freiberg und Hamburg anzufertigen. Dies eröffnet die einzigartige Möglichkeit, dass Studenten bereits in ihrer Ausbildungsphase direkten Zugang zu diesen weltweit einzigartigen Großgeräten haben und Spitzenforschung betreiben können.

Harte, kurzweilige Röntgenstrahlung in Pulsen von weniger als 100 Femtosekunden Dauer, wie sie beispielsweise am *European XFEL* erzeugt werden, eröffnen völlig neue wissenschaftliche Möglichkeiten, um Materie und Materialien auf atomarer Ebene in ultrakurzen Zeitskalen

zu untersuchen. Als einziger Freie-Elektronen-Röntgenlaser weltweit ist der *European XFEL* jetzt in der Lage, intensive Röntgenblitze mit Energien von 25 keV und darüber hinaus zu erzeugen und so in unbekannte Welten vorzudringen und komplexe Phänomene zu untersuchen. Mit der Photonenenergie von 25 keV – das entspricht einer Wellenlänge von 0,5 Angström – stellte die DESY-Betriebsmannschaft, die den *European-XFEL*-Beschleuniger betreibt, einen neuen Wellenlängenrekord für Laserlicht auf.

## Lehre in Hamburg

### Digitaler Kurs zwischen der TU Bergakademie Freiberg und dem *European XFEL*

Neben der Spitzenforschung an weltweit einzigartigen Großgeräten steht die Ausbildung von Studenten verschiedenster Fachrichtungen im Fokus der Aktivitäten der „Professur für Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung“. Dies umfasst auf der einen Seite die unmittelbare Einbindung von Studenten in die Forschung, auf der anderen Seite die Vermittlung von Wissen in Form einer Spezialvorlesungsreihe mit dem Titel „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs)“. Während dieses einwöchigen Kurses werden den Studenten direkt vor Ort in Hamburg von leitenden Wissenschaftlern des EuXFEL Kenntnisse über den Aufbau und die Anwendung der neuesten Generation von Röntgen-Lichtquellen sowie deren vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen der Material-, Werkstoffcharakterisierung und -forschung vermittelt. Der Kurs beinhaltet neben Vorträgen und Diskussionen auch Besuche der EuXFEL-Experimentierhalle sowie der DESY-Röntgenlichtquellen PETRA III und FLASH.

In den letzten Jahren konnte die Arbeitsgruppe dieses neue Modul erfolgreich an der TU Bergakademie Freiberg etablieren, was auch durch konstant hohe Teilnehmerzahlen (trotz der Lage in der vorlesungsfreien Zeit) widerspiegelt werden konnte. Seit dem Sommersemester 2020 ist die Blockvorlesung auch fester Bestandteil des neuen Masterprogrammes „Advanced Materials Analysis“ der Fakultät 5. Darüber hinaus konnten im Jahr 2020 auch Studentinnen und Studenten anderer Institutionen wie der Universitäten Hamburg und Kassel teilnehmen. Aufgrund der weltweitem COVID19-Pandemie



**Abbildung 4:** Luftaufnahme des Betriebsgeländes Schenefeld vom 11. August 2020 (© European XFEL).

war im Jahr 2020 eine Exkursion nach Hamburg nicht möglich. Alternativ konnten eine digitale Variante der Vorlesungsreihe mit Online-Vorträgen organisiert sowie virtuelle Rundgänge durch die einzelnen Großgeräte ermöglicht werden. „Mit fast 100 Teilnehmenden hat sich das Online-Format als geeignet erwiesen, den Kurs für eine größere Anzahl an Studenten zu öffnen. Wir freuen uns jedoch darauf, die Studentinnen und Studenten in Zukunft wieder persönlich in Hamburg begrüßen zu können“, sagte Prof. Serguei Molodtsov.

### Ankündigung Blockvorlesung 2021

Die nächste Blockvorlesung „Materialforschung mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFELs)“ ist vom 27.09. bis 01.10. 2021 erneut als digitales Event geplant. 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 anhand des weltweiten Freie-Elektronen-Röntgenlaser FLASH bei DESY illustriert. Es wird außerdem eine virtuelle Besichtigung des *European XFEL* geben. Die Studierenden erlangen vertiefte Kenntnisse über den Aufbau und die Anwendung der neuesten Generation von Röntgen-Lichtquellen, den Freie-Elektronen-Röntgenlasern. FELs erzeugen Röntgenstrahlung mit sehr hoher Brillanz.

Die Studierenden lernen Messmethoden kennen, bei denen ultrakurze Laserlichtblitze im Röntgenbereich bis zu hunderttausendmal in der Sekunde und mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist, als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art, eingesetzt werden. Freie-Elektronen-Röntgenlaser werden in der Materialforschung und -entwicklung von katalytischen, magnetischen sowie biologischen Stoffen und Hybrid-Strukturen benutzt. Verschiedene experimentelle Methoden und ihre besonderen Möglichkeiten, die nur mit Freie-Elektronen-Röntgenlasern realisiert werden können, werden dargestellt und detailliert erläutert. Die Studierenden sollen mit Hilfe des Moduls in die Lage versetzt werden, die hier kennengelernten Methoden im späteren Berufsleben bei Bedarf zu berücksichtigen und gleichzeitig erste Erfahrungen an einer internationalen Großforschungseinrichtung sammeln.

Interessierte Studierende können sich gerne bis zum 20.08.21 via OPAL registrieren (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Ankündigung der Blockvorlesung 2021 am DESY in Hamburg



## ARBEITSGRUPPE ENERGIEMATERIALIEN

Angesichts der beunruhigenden globalen klimatischen Entwicklungen, insbesondere auf russischem Territorium mit einem fast 2,5-fachen des globalen Temperaturanstiegs, werden immer konkretere Maßnahmen diskutiert und eingeführt. So die globale Energiewende, die unser Leben zunehmend beeinflusst. Doch wie Mary Wollstonecraft Shelley in ihrem 1818 erschienenen Roman „Frankenstein“ schrieb: „Nichts ist für den menschlichen Geist so schmerzhaft wie eine große und plötzliche Veränderung“. Der Roman greift kritisch die Entdeckungen zur Elektrizität von Galvani, Volta und Ritter zu dieser Zeit auf. Die Wissenschaften sind heute mehr denn je gefordert, die globalen Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung anzunehmen und verantwortungsbewusst systemische Lösungsstrategien zu entwickeln – der gesamte Roman mag hier als Mahnung dienen.

Optimismus angesichts der Herausforderungen der globalen Energiewende findet sich hier im Zitat von Hermann von Helmholtz: „Energie geht nicht verloren, sondern kann nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden“. Dies beschrieb er 1847 in seinem Energieerhaltungssatz.

Aufgrund des anhaltend hohen weltweiten Energiebedarfs, der rasanten Zunahme mobiler Geräte und des

Ausbaus der Elektromobilität und erneuerbarer Energien wird die Energiekonversion mit anschließender Energiespeicherung zum wichtigsten Treiber für neue Energiespeichermaterialien. Dies spiegelt sich in der Politik Europas – allen voran Norwegen z. B. mit seinem „Beschluss 672“, der alle Reedereien verpflichtet, ab 2026 nur noch emissionsfreie Wasserfahrzeuge in die Welterbegewässer Norwegens fahren zu lassen – und Chinas mit seinem riesigen Automarkt und seinen intensiven Bemühungen (Investitionen im Milliarden-Dollar-Bereich) wider. Im Jahr 2018 wurden weltweit rund 590 GWh an wiederaufladbaren elektrochemischen Zellen produziert. Bis 2030 wird eine Vervierfachung vorausgesagt. Neben der Blei-Säure-Technologie für den Einsatz in Autobatterien wird die Lithium-Ionen-Technologie aufgrund ihrer hervorragenden Leistungsparameter auch im nächsten Jahrzehnt den Sekundärspeichermarkt dominieren.

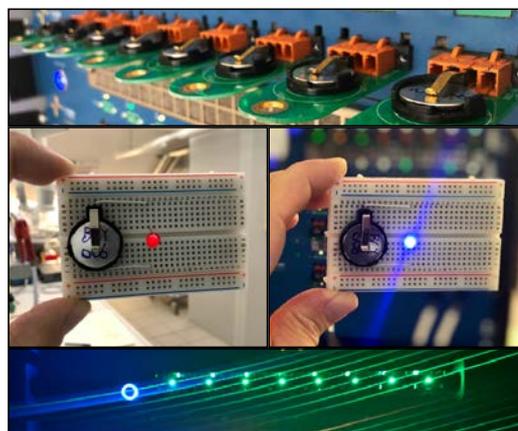
Der Lithium-Ionen-Akkumulator ist zurzeit der attraktivste Akkumulator für portable Geräte und die Elektromobilität. Die Energiedichte hat sich seit seiner Kommerzialisierung im Jahr 1991 fast vervierfacht. Die Lernkurve ist jedoch abgeflacht und die physikalisch-chemische Grenze wird bald erreicht sein. Daher sind in diesem Bereich Sprunginnovationen erforderlich, um

die Energiedichte weiter zu erhöhen oder die Kosten pro kWh zu senken. Diese müssen sich jedoch auch mit der effizienteren Nutzung von Rohstoffen befassen, da die Herausforderungen hinsichtlich des Angebots und der Nachfrage absehbar sind. Während Lithium oft im Zentrum von Diskussionen über Ressourcenverfügbarkeit, Versorgungsengpässe und Kostensteigerungen steht, ist die Nachfrage nach anderen Materialien für Lithium-Ionen-Akkumulatoren wie Kobalt und Phosphor (Teil der positiven Elektrode), aber auch Kupfer (ein Stromkollektor) beträchtlich und spürbar.

Ein wichtiger Nachteil der Lithium-Ionen-Technologie ist, dass für den Ionentransfer ein flüssiger Elektrolyt erforderlich ist, der hauptsächlich aus aprotischen (nicht-wässrigen, organischen) Lösungsmitteln besteht. Viele der Probleme, mit denen diese Akkumulatoren konfrontiert sind, wie z. B. Sicherheitsbedenken, Kapazitätsschwund und -alterung, der umständliche Elektrolytfüll- und Benetzungsprozess während der Produktion und das aufwendige Formierungsverfahren, tragen alle zu hohen Kosten bei und lassen sich auf diesen flüssigen Elektrolyten zurückführen. Sicherheitsbedenken ergeben sich aus der Entflammbarkeit der Lösungsmittel.

Aus diesem Grund sind neue disruptive Technologien, d. h. über Lithium hinausgehende Ansätze, mit einer deutlich höheren theoretischen Energiedichte erforderlich. Dies sind z. B. *All-Solid-State*- oder Hochvalente-Ionen-Akkumulatoren bestehend aus gut verfügbaren Metallen, insbesondere für die negative Metallelektrode. In den letzten Jahren sind diese Konzepte zu vielversprechenden Themen herangereift, die auch die Möglichkeit für neue Anwendungen und Marktteilnehmer sowie für neue führende Industrien und Forschungseinrichtungen auch in Deutschland geben.

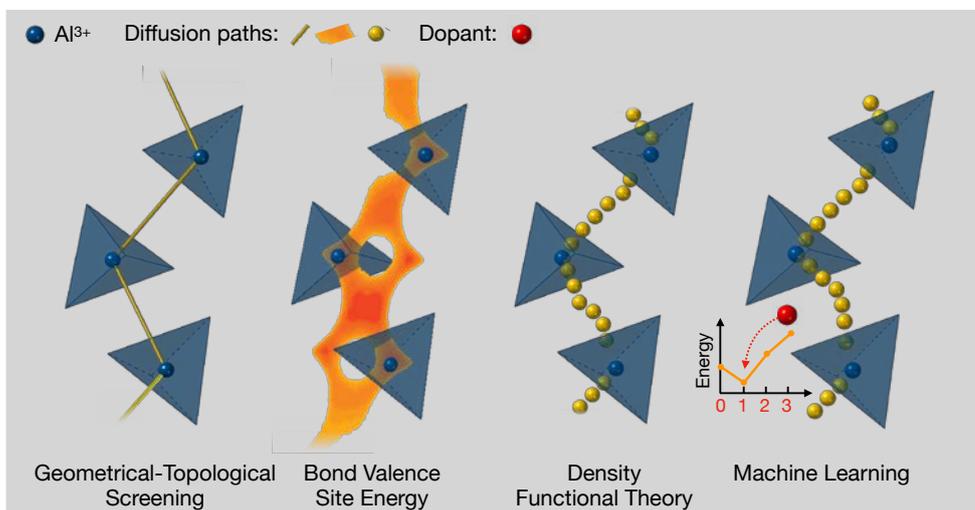
Die Material- und Strukturforchung muss versuchen, die aktuellen Anforderungen auf neue Materialien und Materialkonzepte zu übertragen. Dies soll möglichst effizient und verlustarm in allen Gliedern der Innovations- und Wertschöpfungskette erfolgen, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung von Werkstoffen und Bauteilen bis hin zu den daraus entwickelten Anwendungen. Insbesondere auf dem Gebiet der elektrochemischen Energiespeicherung, d. h. der Akkumulatoren, werden in Zukunft Lösungen mit zusätzlich höchsten Energiedichten, verbesserter Sicherheit und ressourceneffizienten Materialkonzepten (Natur, Energie und Materialien betreffend)



notwendig sein, um den prognostizierten hohen Bedarf nachhaltig zu decken.

Deshalb wurde am IEP in den letzten Jahren ein Bewertungssystem aufgestellt, um neuartige elektrochemische Energiespeicher unter Berücksichtigung von Ressourcen-, Umwelt- und Kostenaspekten zu bewerten. Der erste Schritt bestand in der Bewertung der chemischen Elemente des Periodensystems hinsichtlich ihrer Eignung für neuartige Material- und Speicherkonzepte. Die zur Bewertung der chemischen Elemente berücksichtigten Parameter lassen sich grob in die Kategorien „Elektrochemie“ und „Ökonomie“ einteilen, wobei die Bewertung für die jeweilige Aufgabe anpassbar ist. Es wurde mit der negativen Metallelektrode begonnen, weil das chemische Element dieser Elektrode, das gleichzeitig auch die mobile Spezies darstellt, den größten Anteil neben Sauerstoff in einem Festkörperakkumulator ausmacht. Dementsprechend ist Aluminium neben anderen Elementen wie Magnesium, Eisen, Titan, Natrium, Kalium, Kalzium oder Zink der aussichtsreichste Kandidat.

Das Auffinden von Festkörperelektrolyten und positiven Interkalationselektroden bleibt dann eines der Hauptherausforderungen auf dem Weg zu Hochvalente-Ionen-Festkörperakkumulatoren. Oxide bieten theoretisch höhere Energiedichten, aber auf Kosten der Ionenmobilität. Es wurde daher eine Strategie der sukzessiven Anwendung von immer komplexeren Algorithmen zur Identifizierung potenzieller Ionenleiter aus kristallographischen Datenbanken entwickelt (siehe Abbildung I). Dementsprechend werden die Kristallstrukturen der chemischen Verbindungen zunächst mit einer geometrischen,



**Abbildung I:** Algorithmen zur Identifizierung potenzieller Ionenleiter aus kristallographischen Datenbanken

aber schnellen Methode, der Voronoi-Dirichlet-Partitionierung, analysiert, gefolgt von Berechnungen der *Bond Valence Site Energy* und schließlich der Modellierung der vielversprechendsten Verbindungen durch die Dichtefunktionaltheorie, um den Rechenaufwand bei steigender Berechnungszeit der Algorithmen zu verringern. Mit diesem Ansatz konnten vielversprechende Ionenleiter für eine Vielzahl mobiler Ionen identifiziert werden, die in der gemeinsam mit dem *Samara Center for Theoretical Materials Science* (SCTMS) entwickelten Datenbank *batterymaterials.info* gesammelt und einfach zugänglich gemacht werden.

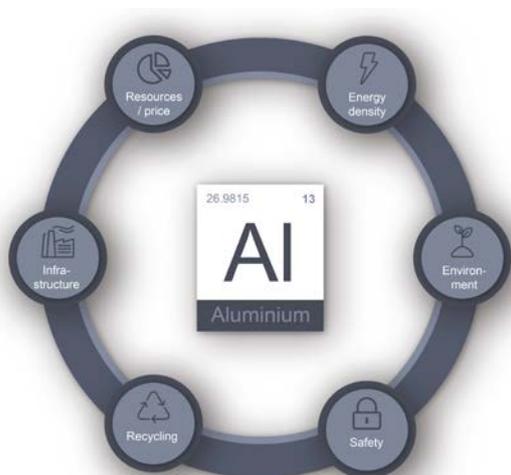
Die Arbeitsgruppe Energiematerialien setzt damit etablierte und moderne Kristallographie-inspirierte Methoden, Methoden der Kristallchemie und der Elektrochemie zur Schaffung neuer technologischer Ansätze und Lösungen im Bereich der Energiewandlung und -speicherung ein. Mit besonderem Schwerpunkt werden Batteriematerialien, Ionenleiter, Materialien mit komplexen strukturellen Feinheiten auf atomarer Skala, modulierte Strukturen und aperiodische Kristalle bearbeitet, wobei die *N*-dimensionale Kristallographie, röntgenographisch bestimmte Elektronendichten, das *Knowledge Mining* und das *Machine Learning* besondere Akzente setzen. Im Fokus der Arbeiten stehen Materialien aus den Bereichen der Energiewandlung und -speicherung: Ionenleiter, Interkalationselektroden, Stromkollektoren sowie Pyroelektrika, intermetallische Phasen und dünne Schichten.

Weitere Themen betreffen methodische Arbeiten zur Röntgendiffraktometrie und der Anwendung von textilen Geweben zur Verminderung der Strahlenexposition.

## Ionenleiter für Aluminiumionen

Das Forschungsgebiet der Aluminium-Ionen-Akkumulatoren hat sich in den letzten 10 Jahren rasant als ein wichtiges Thema neben der Aluminium-Luft-Technologie entwickelt und etabliert. Dementsprechend gehört die „Aluminium-based Energy“ zu den von der Europäischen Kommission benannten „100 Radical Innovation Breakthroughs for the future“. Eine Vielzahl von verschiedenen und vielversprechenden Systemen wurden entwickelt und die Herausforderungen herausgearbeitet. Für einen Aluminium-Ionen-Akkumulator gibt es neben der hohen Energiedichte und guten Verfügbarkeit von Aluminium viele weitere Vorteile (siehe Abbildung 2).

Allerdings bestehen wegen der hohen Valenz des dreifach geladenen Aluminium-Ions Herausforderungen hinsichtlich der Ionenleitung und Interkalation bzw. Deinterkalation. Der in 2019 in der Fachzeitschrift „*Frontiers in Chemistry – Inorganic Chemistry*“ erschienene Review-Artikel „The Aluminum-Ion Battery: A Sustainable and Seminal Concept?“ fasst die Entwicklungen zusammen. Er hat sich zum meistgelesenen Artikel in der Rubrik „*Inorganic Chemistry*“ entwickelt und befindet sich



**Abbildung 2:** Vorteile von Aluminium als Batteriematerial

unter den zehn meistgelesenen Artikeln von „Frontiers in Chemistry“.

Gemeinsam mit dem SCTMS ist das Screening weiterer Materialklassen fortgeführt worden. Ergebnisse dazu werden in 2021 erwartet. Es wurde weiterhin damit begonnen, die vorhergesagten Ionenleiter zu synthetisieren (siehe Abbildung 3) und elektrochemisch zu charakterisieren. Im Rahmen der Bachelorarbeit „Synthese und Charakterisierung von Kathodenmaterialien für Aluminium-Ionen-Akkumulatoren“ untersuchte Huy Nguyen Dang Duc die Eignung der Verbindung  $AlVO_3$  als neuartiges Kathodenmaterial. Hierbei nutzte er die Festkörpersynthese zur Materialherstellung, charakterisierte den Phasenbestand mittels *In-situ*-Röntgenpulverdiffraktometrie und führte elektrochemische Messungen durch. Hierbei stellt jedoch die noch zu geringe Phasenreinheit des synthetisierten Materials eine Hürde bei der Interpretation der Ergebnisse dar. Neue Syntheseansätze sollen die Phasenreinheit erhöhen.

## Zink-Ionenleiter

Zink als negative Elektrode hat bereits eine mehr als 200-jährige Historie hinter sich, wobei hier die galvanische Zelle, die voltaische Säule, die Alkali-Batterien und insbesondere die Zink-Luft-Batterien zu nennen sind. Neben vielen positiven Eigenschaften des Zinks, haben

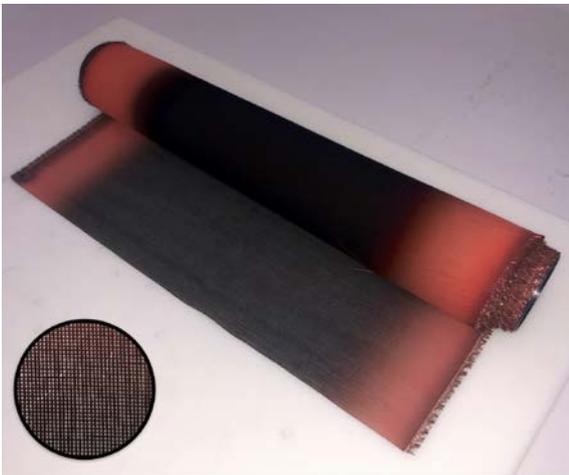


**Abbildung 3:** Proben von potentiellen Festkörper-Ionenleitern

wiederaufladbare Zink-Ionen-Batterien das Potenzial, besonders umweltfreundlich zu sein und die volumetrische Kapazität im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkumulatoren um den Faktor drei zu erhöhen. In den letzten Jahren konnte daher ein wachsendes Interesse an Zink-Ionen-Akkumulatoren beobachtet werden. Gemeinsam mit dem SCTMS und der *National University of Singapore* wurde ein Material-Screening – wie oben beschrieben – durchgeführt, um neuartige Zink-Ionenleiter (Interkalationselektroden und Festkörperelektrolyte) zu identifizieren.

## Datenbank zu Festkörperelektrolyten und Interkalationsmaterialien

Zur Sicherung und Bereitstellung von Wissen zu Ionenleitern und Interkalationsmaterialien sowie um die in den gemeinsamen Aktivitäten der letzten Jahre vorhergesagten Ionenleiter und Interkalationsmaterialien zu sammeln, zu systematisieren und bereitzustellen, schaffte das SCTMS die Plattform *batterymaterials.info*. Artem A. Kabanov, der Leiter des *Laboratory for Mathematical Modeling of Materials* des SCTMS und Verantwortlicher für die Datenbank, entwickelt diese gemeinsam mit Tilmann Leisegang weiter. Der über das Internet zugänglichen



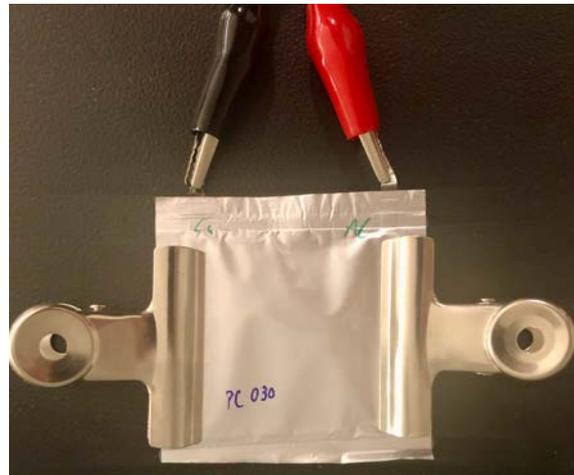
**Abbildung 4:** Gewebebasierter folienartiger Kupferstromkollektor der elfolion GmbH zur Weiterverarbeitung zu Elektroden

Datenbank wurden in 2020 weitere Datensätze und ein Visualisierungstool hinzugefügt.

## Lithium-Ionen-Technologie

Sprunginnovationen im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie sind durch verschiedene Ansätze denkbar: zuvorderst die Ausarbeitung von Festkörperakkumulatoren mit einer Lithium-Metallelektrode. Gemeinsam mit der elfolion GmbH geht das IEP aber einen anderen Weg. Hierbei lässt ein von der elfolion patentierter Ansatz deutlich gesteigerte Energiedichten bzw. spezifische Energien mit gleichzeitig signifikant reduziertem Metallbedarf für die Lithium-Ionen-Technologie erwarten. Dieser Ansatz basiert auf einer Lithium-Ionen-Zelle mit metallisierten gewebebasierten Stromkollektoren (siehe Abbildung 4). Dazu wurde eine Zusammenarbeit etabliert, ein gemeinsames Forschungs- und Entwicklungsvorhaben vorbereitet und mit diesem im August 2020 begonnen.

Das Projekt „Entwicklung von folienartigen, ressourceneffizienten, gewebebasierten Stromkollektoren für Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen mit hoher Energie- und Leistungsdichte aus feinsten Glasmultifilamentgarnen und Metalldrähten“ wird mit Mitteln des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert. Neben der elfolion GmbH und dem Institut für Experimentelle Physik ist



**Abbildung 5:** Elektrisch kontaktierte Pouchzelle mit gewebebasierten folienartigen Stromkollektoren

das Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden weiterer Partner im Verbund. Ziel ist es, neuartige ressourceneffiziente Stromkollektoren für Lithium-Ionen-Zellen zu entwickeln, herzustellen, hochzuskalieren und zu verifizieren, die eine 15% höhere Energie- und Leistungsdichte im Vergleich zu konventionellen Zellen ermöglichen und dabei 85% weniger Metall benötigen. Dazu sollen Drehergewebe auf Basis feinsten Multi- und Monofilamentgarne aus Glas, Kohlenstoff, Polymer und Metall entwickelt und deren Herstellbarkeit auf dafür zu modifizierenden Webmaschinen verifiziert werden. In einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren sollen Stromkollektorbänder mit einer minimalen Länge von 30 m und Breite von 0,12 m hergestellt und in einem zweiten Schritt in einem neuartigen Vakuumbeschichtungsverfahren mit Kupfer und Aluminium zu Ausgangskomponenten für Zellelektroden beschichtet werden. Diese Stromkollektoren ermöglichen eine dreidimensionale Kombination der elektrisch und ionisch leitfähigen Materialkomponenten, was zu einer Metalleinsparung und einer verbesserten Anbindung des Elektrodenmaterials führt. Weiterhin werden komplette Zellen assembliert und die elektrochemischen Parameter charakterisiert.

Stromkollektoren dienen funktionell als Brücke zwischen externer Elektronik und elektrochemischen Prozessen innerhalb der Lithium-Ionen-Zellen. Sie haben keinen Beitrag zur Gesamtkapazität, machen aber 15%

bis 50 % der Gesamtmassen von Kathoden und Anoden aus. Damit reduzieren sie signifikant die Energiedichten der Zellen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit und einer Masterarbeit wurden Elektroden gefertigt und zu Knopf- und Pouchzellen zusammengefügt (siehe Abbildung 5). Es konnte bereits eine Steigerung der gravimetrischen Kapazität um 220 % bezogen auf kommerzielle Anoden und 120 % bezogen auf beide kommerziellen Elektroden erreicht werden. Die weiteren Arbeiten zielen auf die Fertigung von Elektroden mit noch dünneren Stromkollektorgeweben ab.

Für weitere Steigerungen der Energiedichte von Lithium-Ionen-Akkumulatoren wird aktuell an Silizium-basierten Elektroden gearbeitet, die die kohlenstoffartigen Materialien, insbesondere Graphit, das am häufigsten genutzte Anodenaktivmaterial, ersetzen sollen. Nachteil des Graphits ist die niedrige theoretische Energiedichte von  $372 \text{ mAhg}^{-1}$  ( $\text{LiC}_6$ ). Silizium hingegen weist eine mehrfach höhere Energiedichte von  $4212 \text{ mAhg}^{-1}$  ( $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ ) auf und stellt damit eine attraktive Alternative zu Graphit dar. Mehr noch, Silizium gehört zu sehr gut verfügbaren Rohstoffen, ist umweltunbedenklich, preiswert und es stehen ausgereifte Technologien und Know-how entlang einer breiten Wertschöpfungskette zur Verfügung. Herausforderungen bei der Nutzung von Silizium als Anodenmaterial ergeben sich jedoch hinsichtlich der erheblichen Volumenänderung der Wirtsmatrix während der Interkalation und Deinterkalation der Lithium-Ionen bei Auf- und Entladung entsprechender Energiespeicher. Die Volumenänderung liegt für Graphit bei ca. 10 %, für Silizium dagegen bei ca. 400 %. Dies kann zu hohen mechanischen Spannungen und in der Folge zu einem Kontaktverlust zwischen Elektrodenmaterial und Stromkollektor bis hin zur vollständigen Zerstörung des Elektrodenmaterials führen.

Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Anodenverhaltens besteht in der Präparation und Nutzung sogenannter 3D-Silizium-Kompositmaterialien. Hierzu werden die 3D-Silizium-Strukturen direkt auf einer metallischen Folie (z. B. Al, Ni) erzeugt und einem geeigneten thermischen Behandlungsverfahren, z. B. der Blitzlampenausheilung, unterzogen. Dieses Verfahren ist kostengünstig und weist eine hervorragende Skalierbarkeit für das Anodenmaterial auf. Ferner wird durch dieses Präparationsverfahren die Stabilisierung der Silizium-Nanostrukturen erreicht, die Volumenänderung während Ein- und Auslagerung des

Lithiums minimiert und so die elektrische Kontaktierung sowie der gesamte Materialverbund erhalten.

Ein entsprechendes Patent mit dem Titel „Verfahren zur Herstellung von auf Silizium basierenden Anoden für Sekundärbatterien“ wurde im Rahmen des Projekts „Entwicklung von Silizium-basierten Anodenmaterialien für Sekundärbatterien mit hohen Energiedichten“ (SiNergy, SAB 100256790) vom IEP zurückliegend angemeldet und in 2020 an die Rovak GmbH verkauft.

## Superkondensatoren

Superkondensatoren, die ebenfalls zu den elektrochemischen Energiespeichern gehören, weisen einen vergleichbaren Aufbau zu den Lithium-Ionen-Batterien auf. Im Unterschied zu diesen besitzen sie jedoch eine um ein bis zwei Größenordnungen höhere Leistungsdichte, wobei die Energiedichte um ähnliche Werte erniedrigt ist. Dies liegt an einem anderen zugrunde liegenden chemischen Speichermechanismus, der mit der Bildung einer elektrischen Doppelschicht an der Elektroden-Elektrolyt-Grenzfläche zusammenhängt, wie auch bei Elektrolytkondensatoren.

Materialien für Superkondensatoren waren zurückliegend am IEP bereits Gegenstand der Forschungen. So wurden Membrane aus umweltfreundlichem, biologisch abbaubarem und gleichzeitig gut verfügbarem Chitin zur Herstellung flexibler, kleiner und dünner Speicher hergestellt. Es gelang damals zum ersten Mal, eine neue Chitosan/Chitin-Membran auf Chitin-Basis herzustellen. Gemeinsam mit der *University of Science and Technology* in Teheran (Iran) wurde nun eine weitere interessante Materialklasse untersucht, die Silicene. Dies sind zweidimensionale, allotrope Modifikationen des Siliziums mit einer hexagonalen Kristallstruktur, ähnlich der des Graphens. Graphen-basierte Materialien mit hoher Oberfläche und guten elektrischen Leitfähigkeiten sind bereits attraktive Kandidaten für Elektroden für Superkondensatoren. *First-Principles*-Studien an Silicenen zeigten das hohe Potenzial auch dieser Verbindungen aufgrund ihrer hohen Kapazitäten auf. Hierbei setzt sich die Kapazität solcher Materialien aus zwei Anteilen zusammen: der Doppelschichtkapazität und der Quantenkapazität. Während erstere mit der Benetzbarkeit der Elektrode und der Zugänglichkeit des Elektrolyten zusammenhängt, ist



letztere proportional zur elektronischen Zustandsdichte der Elektrode.

In der Kooperation wurde die Quantenkapazität von idealem und defektem Silicen und Silicen-ähnlichen-Strukturen mit der Zusammensetzung  $XSi_3$  ( $X = Al, B, C, N, P$ ) mittels *First-Principles*-Rechnungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ideale  $XSi_3$ -Schichten bis zu einem Faktor zwei größere Quantenkapazitätswerte im Vergleich zu idealem Silicen und Graphen haben. Diese wurden auf die elektronische Struktur zurückgeführt, wobei Orbitale der X- und Si-Atome dazu beitragen. Defekte wie eine einfache Vakanz, eine doppelte Vakanz und sogenannte *Stone-Wales*-Defekte haben keinen signifikanten Einfluss auf die Quantenkapazität der  $XSi_3$ -Strukturen. Die Ergebnisse sind in einer gemeinsamen Arbeit mit dem Titel „Exploring the performance of pristine and defective silicene and silicene-like  $XSi_3$  ( $X = Al, B, C, N, P$ ) sheets as supercapacitor electrodes: a density functional theory calculation of quantum capacitance“ in der Zeitschrift „*Physica E*“ erschienen.

## Verschiedenes

*Machine Learning* und *Knowledge Mining* gewinnen zunehmend in der Materialforschung und insbesondere für Energiespeichermaterialien an Bedeutung. Zurückliegend konnte in einer Kooperation aus SCTMS und IEP die Nützlichkeit beider Ansätze für die Modellierung und Vorhersage von Effekten der Dotierung in kristallinen Festkörperelektrolyten und Interkalationselektroden gezeigt werden. Dieser Ansatz wurde nun auch auf die Klasse der intermetallischen Verbindungen angewendet. So konnte ein neuer Mackay-Approximant im Scandium-Palladium-System entdeckt werden, also eine Vorstufe

eines Quasikristalls. Diese Arbeit erfolgte innerhalb einer Kooperation des IEP mit den Universitäten Genua, Mailand und Samara. Die Ergebnisse sind in der Zeitschrift der *American Chemical Society* „*Chemistry of Materials*“ mit dem Titel „A new 1/1 Mackay type approximant in the Sc–Pd system: from topological data mining to the bench“ erschienen.

Für eine neue Art der Katalyse von Wasser, der Pyroelektrokatalyse wurde ein neuer thermodynamischer Zyklus eingeführt. Unter Pyroelektrokatalyse versteht man die Umwandlung von thermischer Energie direkt in chemische Energie. Vor dem Hintergrund erneuerbarer Energien und dem Bedarf an effizienten industriellen Prozessen ist die Umwandlung von Abwärme in Wasserstoff von besonderer Relevanz. Auch „Hydrogen fuel“ gehört zu den von der Europäischen Kommission benannten „100 Radical Innovation Breakthroughs for the future“. Da die bekannten thermodynamischen Zyklen für das pyroelektrische *Energy Harvesting* nicht angemessen zu den Bedingungen passen, die in einem reaktiven Medium wie Wasser angetroffen werden, wurde vom IEP ein neuer thermodynamischer Ladungs-Spannungs-Zyklus, der durch feste obere und untere Potentiale gekennzeichnet ist, eingeführt. Die Ausarbeitung ist in der Fachzeitschrift „*Physical Chemistry Chemical Physics*“ mit dem Titel „Pyroelectrically-driven chemical reactions described by a novel thermodynamic cycle“ erschienen und rangierte dort in den Top 5% aller von Altmetric gerankten Forschungsarbeiten (Platz 29 von 11354).

Die im Rahmen der Masterarbeit von Tina Weigel entstandenen Ergebnisse zur Präparation von Einkristallen für die Röntgeneinkristalldiffraktometrie mithilfe des *Focused Ion Beams* wurden im „*Journal of Applied Crystallography*“ unter dem Titel „X-ray diffraction using focused-ion-beam-prepared single crystals“ veröffentlicht.



**Abbildung 6:** Teilnehmer des 30. Seminars des Arbeitskreis Elektrochemie in Sachsen am 7. Februar 2020

Hierbei wurde aufgezeigt, wie gezielt kristalline Bereiche für die kristallographische Strukturanalyse herauspräpariert werden können. Dies ist insbesondere für die Bestimmung hochpräziser Elektronendichten und Strukturdaten, beispielsweise für die Berechnung der spontanen Polarisierungen und der pyroelektrischen Koeffizienten, von hoher Relevanz. Die Studie wurde am Beispiel von  $\text{LiNbO}_3$ -Einkristallen durchgeführt. Besonders empfehlenswert ist diese Präparationstechnik für empfindliche Proben, für eine minimalinvasive Präparation sowie für die Präparation von Kristallen aus bestimmten Bereichen, komplexen Materialarchitekturen und Materialien, die mit herkömmlichen Methoden (Brechen oder Schleifen) nicht präpariert werden können.

Anlässlich des 80. Geburtstags von Peter Paufler wurde der Artikel „From the Ritter pile to the aluminum ion battery – Peter Paufler’s academic genealogy“ in der Zeitschrift für Kristallographie veröffentlicht. Peter Paufler ist der Spiritus Rector der Arbeitsgruppe am IEP. Der Artikel beschreibt einen Zweig der Entwicklung der Kristallographie und zeigt dabei auch Anknüpfungen an Arbeiten von Johann Wilhelm Ritter, dem Erfinder des ersten Akkumulators, auf.

Zum 30. Seminar traf sich der Arbeitskreis Elektrochemie in Sachsen (AKES) an der TU Bergakademie

Freiberg (siehe Abbildung 6). Tilmann Leisegang, der seit Januar 2020 Mitglied des AKES ist, organisierte dieses Treffen gemeinsam mit Rudolf Holze, dem Gründer und Leiter des AKES. Vertreter des Fraunhofer-Instituts für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) und des Technologiezentrums Hochleistungsmaterialien (THM), des Instituts für Chemie (Elektrochemie) der TU Chemnitz, des Kurt-Schwabe-Instituts Meinsberg sowie des Instituts für Anorganische Chemie (Salz- und Mineralchemie) und des IEP (Energiewandlung) der TU Bergakademie Freiberg trugen zum Programm bei. Es wurden Themen wie elektrochemische Materialwissenschaft, elektrochemische Energiewandler und elektrochemische Analytik behandelt. Der Arbeitskreis Elektrochemie wurde bei einem ersten Treffen am 16. Juni 1995 in Chemnitz von Rudolf Holze als offene Plattform für Elektrochemiker und Oberflächenwissenschaftler in Universitäten, Forschungseinrichtungen und in der Industrie in Sachsen gegründet. Er dient dem Wissenstransfer, dem Erfahrungsaustausch und der Information über Ereignisse, Trends und neue Möglichkeiten.

Die finanzielle Unterstützung der Arbeiten erfolgte im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts R2R-Battery, des SAB-Verbundprojekts Sinergy und des ZIM-Verbundprojekts LilonSK.



---

## 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 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.

Wesentliches Know-how und eine breite Infrastruktur zu pyroelektrischen Materialien wurden im Rahmen

verschiedener Projekte und Kooperation mit lokalen und internationalen Partnern innerhalb der vergangenen zehn Jahre aufgebaut und im FZP gebündelt. Wichtige Meilensteine waren:

- 2007: Pyroelektrische Röntgenstrahlerzeugung mit Lithiumniobat.
- 2009–2011: BMBF-Verbundvorhaben „Biomimetische Mineralisation für die Technik (BIOMINT)“. Im Zentrum des Vorhabens stand die Nutzung der besonderen Eigenschaften pyroelektrischer kristalliner Materialien in Verbindung mit biotechnologischen und physiko-chemischen Prozessen. Mit diesem neuartigen technologischen Ansatz wurden vielversprechende Anwendungen im Bereich der Bioverfahrenstechnik, der Umwelttechnologie und der Lebenswissenschaften erarbeitet.
- 2009: Nachweis der desinfizierenden Wirkung pyroelektrischer Oberflächen.
- 2010: Nachweis der eisabweisenden Wirkung pyroelektrischer Oberflächen.
- 2010: Nachweis der Radikalerzeugung an pyroelektrischen Oberflächen.

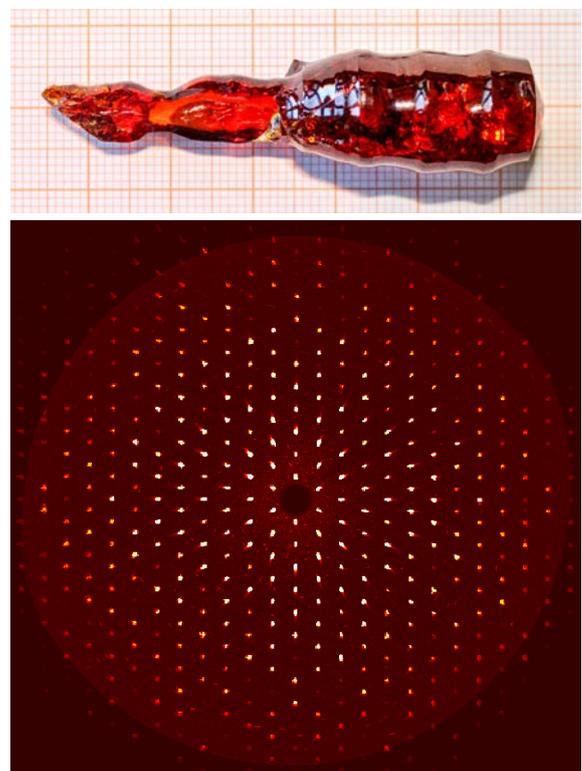


- 2012–2014: ESF-Nachwuchsforschergruppe „Pyroelektrische Funktionsmaterialien für die Energie- und Stoffwandlung (PyroConvert)“. In der interdisziplinären Gruppe wurden auf Pyroelektrika basierende Konzepte für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme für Energie- und Stoffwandlungsprozesse erarbeitet.
- 2013: Messaufbau zur Bestimmung pyroelektrischer Koeffizienten mit der Sharp-Garn-Methode im Temperaturbereich von 0 °C bis 170 °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.
- 2013–2014: Bau eines Demonstrators zur Wasserstofferzeugung im Rahmen der ESF-Nachwuchsforschergruppe PyroConvert.
- 2014: Vakuumkammer zur Polarisierung pyroelektrischer Proben bei Spannungen bis zu 30 kV.
- 2015: Erstmaliger Nachweis von Pyroelektrizität der MFP-Phase von Strontiumtitanat mittels elektrischem Feld und Defektmigration.
- 2016: UHV-Vakuumkammer zur Bestimmung pyroelektrischer Koeffizienten bei hohen Temperaturen bis 1000 °C.
- 2016–2019: DFG-Paketantrag 921 „Pyro- und dielektrische Eigenschaften von Hochtemperaturpiezoelektrika der Oxoborat-Familie  $RX_2Z_2O(BO_3)_3$ “ zusammen mit dem Institut für Mineralogie und der Ruhr-Universität Bochum.
- 2017–2019: AiF-Forschungsvorhaben „Pyroelektrische Polymere für die Abwärmenutzung – PyroFol“.
- 2017: Korona-Aufbau zur kontaklosen Polung von pyroelektrischen Polymerproben.
- 2019: Portabler Messplatz zur Bestimmung pyroelektrischer Koeffizienten an Polymerproben.

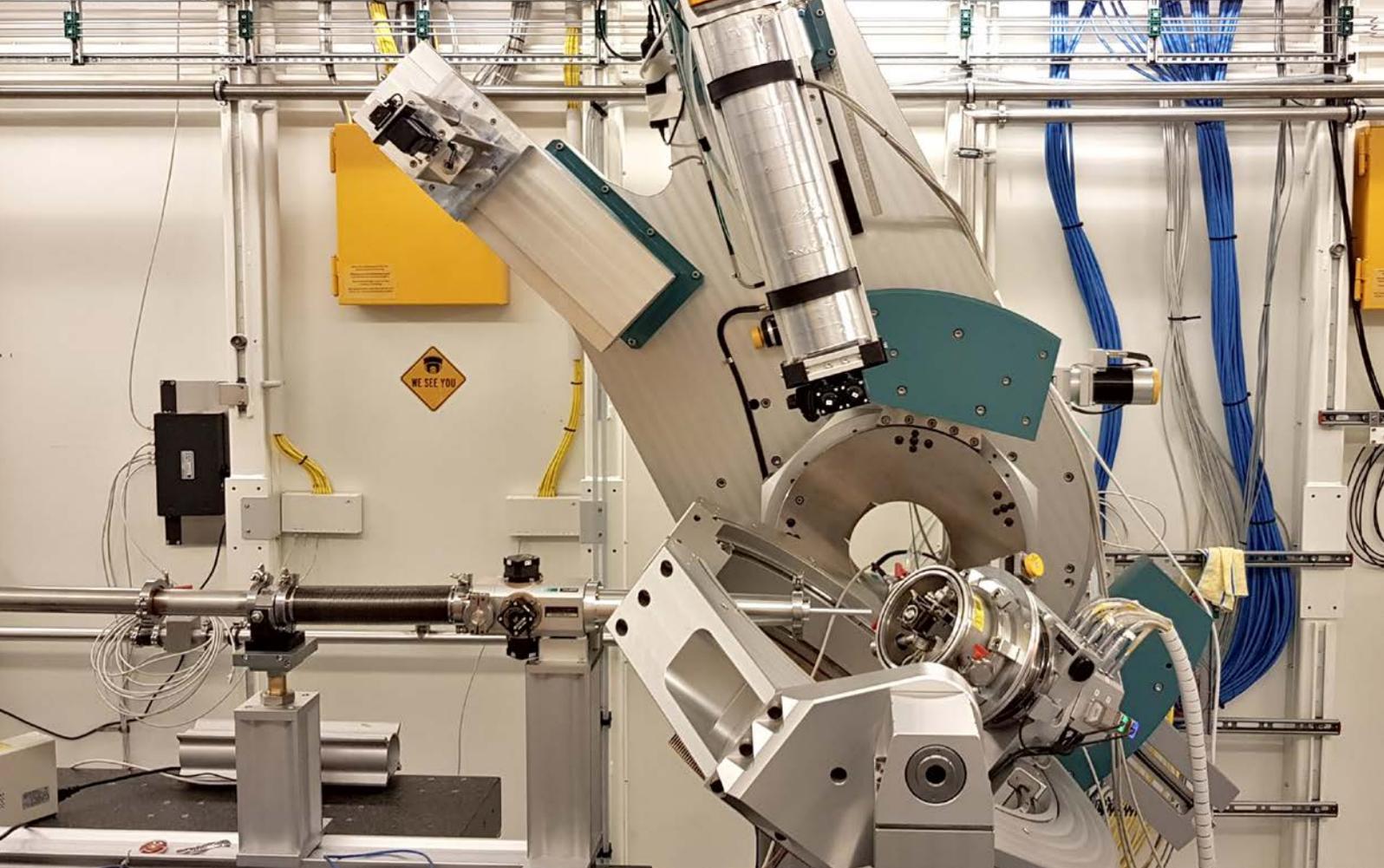
## Charakterisierung pyroelektrischer Materialien

Die im FZP bearbeiteten Projekte reichen von der Kristallzucht über die Strukturaufklärung bis zur Charakterisierung dielektrischer und pyroelektrischer Eigenschaften. Beispielhaft zeigt die Abbildung einen am Institut für Mineralogie gezüchteten  $PrCOB$ -Einkristall und einen zugehörigen Schnitt durch den reziproken Raum, der per Röntgendiffraktometrie gemessen wurde.

Weiterführende Informationen zum FZP finden Sie unter <http://pyro.tu-freiberg.de>.



**Abbildung:** Foto eines  $PrCa_4O(BO_3)_3$ -Einkristalls (oben) und  $hk0$ -Schnitt durch den reziproken Raum (unten)



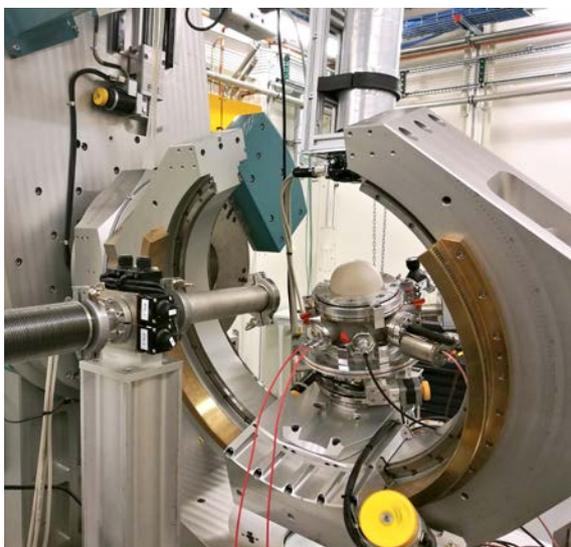
## ARBEITSGRUPPE RESONANTE RÖNTGEN-METHODEN UND KRISTALLMODELLIERUNG

Die Tätigkeiten der Arbeitsgruppe unter der Leitung von Dr. Matthias Zschornak beinhalten sowohl die experimentellen als auch theoretischen Aspekte resonanter Röntgenmethoden. Im Projekt REXSuppress (Abschluss Juni 2020) stand die Anwendung und methodische Weiterentwicklung resonanter Röntgenmethoden an Synchrotron-Forschungseinrichtungen im Mittelpunkt. Dagegen liegt der Fokus im Projekt AcoustREXS auf der begleitenden Modellierung der atomaren und elektronischen Struktur kristalliner Materialien sowie der Vorhersage von Kristallstrukturänderungen inklusive entsprechender Materialeigenschaften.

Die zentralen materialbezogenen Fragestellungen der Gruppe betreffen das Verhalten und die Eigenschaftsänderung von Kristallen bei Phasenumwandlungen durch elektrische Felder, unter Einwirkung von akustischen Wellen und durch den Einbau von Defekten, insbesondere bei Oxiden ( $\text{SrTiO}_3$  und dessen Ruddlesden-Popper-Phasen,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{RbH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), Halbleitermaterialien (GaAs, InP, CdSe), Seltenerdverbindungen ( $\text{R}_2\text{TSi}_3$ ,  $\text{YMn}_2\text{O}_5$ ), Pyroelektrika ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ) sowie ferroelektrischen Dünnschichten ( $\text{SrTiO}_3$ ).

Genutzt werden dafür vor allem resonante Synchrotronmethoden (*Resonant X-ray Diffraction*, RXD), wie *X-ray-Absorption Fine Structure* (XAFS, XANES, EXAFS), *Diffraction Anomalous Fine Structure* (DAFS), *Anisotropic Anomalous Scattering* (AAS) sowie nicht-resonante Methoden wie *Reciprocal Space Mapping* (RSM) und *X-ray Standing Waves* (XSW). Für die Modellierung kommen Dichtefunktionaltheorie (DFT), *Core State Excitation Modelling* (FDMNES, FEFF) und Finite-Elemente-Methoden (FEM) zum Einsatz.

Die Arbeitsgruppe widmet sich nicht nur der methodischen, sondern auch der apparativen Weiterentwicklung von Synchrotronmethoden. Dies beinhaltet u. a. die Entwicklung und Konstruktion einer individuell angepassten Probenkammer, der sogenannten Nordseekammer (siehe Abbildung 1). Die Nordseekammer wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts mit dem Schwerpunkt „Erforschung kondensierter Materie an Großgeräten“ für die Beamlines P23 und P24 am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) konzipiert und konstruiert, um Proben mittels elektrischer Felder unter



**Abbildung 1:** Die Nordseekammer ermöglicht Synchronmessungen simultan zur Probenbeeinflussung mittels elektrischer Felder und Temperatur.



**Abbildung 2:** Durch die Positioniereinheit der Kontaktiernadel wurden ohne Öffnen der evakuierten Probenkammer verschiedene elektrische Kontakte angefahren und gemessen.

variablen Temperaturen zu manipulieren. Die Nordseekammer kam 2020 aufgrund ihrer Spezialausstattung in einer gemeinsamen Messzeit mit dem IKZ zum Einsatz. Untersucht wurde das resistive Schalten von Strontiumtitanatfilmen. Je Probe hatten die Schichten mehrere Kontakte, zwischen denen mittels der in der Nordseekammer vorhandenen Kontaktiernadel mit Positioniereinheit (siehe Abbildung 2) schnell und ohne mehrfaches Öffnen der Kammerkuppel gewechselt werden konnte. Die Funktionen der Probenkammer werden als Beitrag zur apparativen Methodenentwicklung der Synchrotronexperimente von der Arbeitsgruppe stetig weiter optimiert. Zukünftig soll die Ansteuerung der Nordseekammer in die Beamline-Software integriert und für die Durchführung von Messungen der pyroelektrischen Koeffizienten nach der Sharp-Garn-Methode programmiert werden.

Matthias Zschornak wird bei den experimentellen Arbeiten, der Durchführung von Messreisen, der Datenauswertung und den theoretischen Modellierungen durch die Doktorandin M. Sc. Tina Weigel unterstützt. Auch der ehemalige Kollege Dr. Carsten Richter, welcher seit Anfang des Jahres 2019 am Leibniz-Institut für

Kristallzucht in Berlin arbeitet, steht weiterhin als externer Berater bei Messzeiten und der Datenauswertung zur Seite. Im Bereich der *Ab-initio*-Modellierungen wird die Arbeitsgruppe durch den Doktoranden M. Sc. Christian Ludt verstärkt. Auch Dr. Melanie Nentwich, welche nach erfolgreicher Promotion in der Gruppe zum Thema „Die Struktur der Seltenerd-Übergangsmetall-Silizide“ (zwei Veröffentlichungen sind aktuell dazu erschienen) an die Beamline P23 von Dr. Dmitri Novikov ans DESY in Hamburg wechselte, arbeitet immer noch eng mit der Arbeitsgruppe zusammen.

Im Jahr 2020 ist besonders die Auszeichnung von Matthias Zschornak mit dem Max-von-Laue-Preis der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie im Rahmen des *Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020* in Breslau hervorzuheben. Mit dem Preis für hervorragende Leistungen im Bereich der Nachwuchswissenschaft wurden sein Beitrag zur methodischen Weiterentwicklung der Resonanten Röntgenstreuung zur Sichtbarmachung von Orbitalen sowie seine Arbeiten zur Defektmigration und -separation in Oxiden unter Einfluss externer Felder gewürdigt.



---

## ZENTRUM FÜR EFFIZIENTE HOCHTEMPERATUR-STOFFWANDLUNG

### Erfolgreicher Wettbewerb auf Bundesebene

Im Zeitraum der Jahre 2012 bis 2015 beteiligte sich die TU Bergakademie Freiberg (TU BAF) 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 nun in den Jahren 2015 bis 2020 ca. 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



Forschungsprogrammatik von überregionaler und nationaler Bedeutung ist.

Zum mehrstufigen Antragsverfahren gehörten die Vorlage einer Antragsskizze wie auch eines umfangreichen Vollertrags beim Wissenschaftsrat, wobei der TU Bergakademie Freiberg 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 Professor 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

Forschungsprogrammatik 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 Forschungsprogrammatik bilden u. a. an der TU BAF bearbeitete Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) 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 Aneziris) und 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 BAF 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 Technikums- und Pilotversuchsanlage bis hin zur Großversuchstechnik in einer für die industrielle Nutzung erforderlichen skalennmäßigen 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 ablaufen. 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 Empfehlung zur Förderung des Vorhabens unterstreicht der Wissenschaftsrat die erhebliche strategische

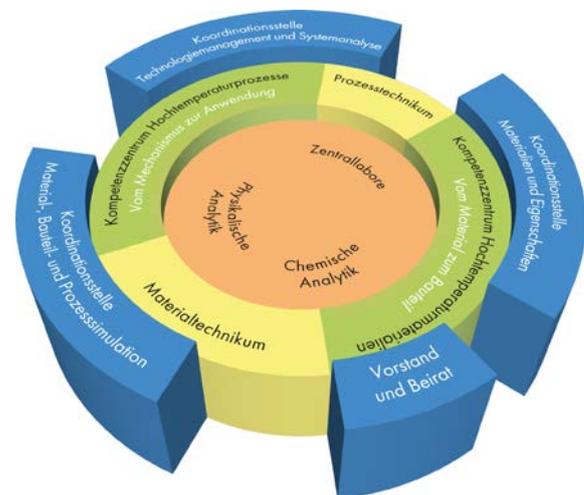


Abbildung 1: Teilbereiche des ZeHS

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

### Strukturelle Kennzeichen

Das ZeHS ist im Rahmen der interdisziplinären Arbeitsgegenstände der Forschungsprogrammatik für alle Professuren der TU BAF 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 der TU BAF wird durch das Prozess- und Materialtechnikum des ZeHS abgerundet (siehe Abbildung 1). Zur Umsetzung der Forschungsprogrammatik

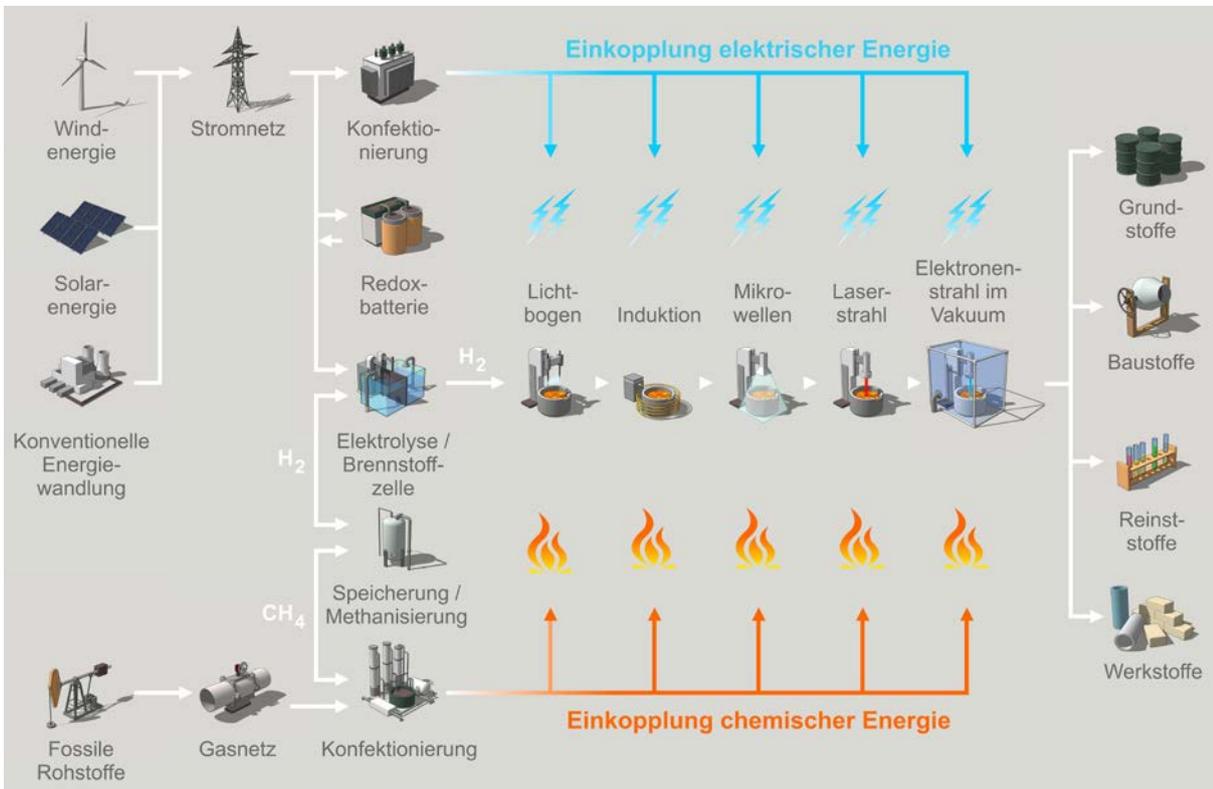


Abbildung 2: Stoff- und Energiekreisläufe mit HT-Prozessen, die am ZeHS betrachtet werden sollen

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 „-materialien“

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-Prozess-Anlagen gebündelt, die für die Erzeugung der meisten industriellen Grundstoffe (z. B. Metalle, Keramik, Glas und Basischemikalien) von essentieller Bedeutung sind (siehe Abbildung 2). 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 zusammengeführt werden, mit dem Ziel ein umfassendes Stoff-, Prozess-, Material- und Modellierungswissen der beteiligten Fachdisziplinen für eine neue Generation von HT-Prozessen bereitzustellen.

Das Kompetenzzentrum „HT-Materialien“ bündelt die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS für



**Abbildung 3:** Richtfest am 22. März 2019

synthetische feuerfeste Materialien. 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 Fügetechnik, bis hin zum Recycling, geschlossen abzubilden.

### Koordinationsstellen

Die beiden Kompetenzzentren bilden zusammen mit drei Koordinationsstellen die fachliche Gliederung des ZeHS (siehe Abbildung 1). Die Koordinationsstellen „Materialien und Eigenschaften“, „Material-, Bauteil- und Prozesssimulation“ und „Technologiemanagement und Systemanalyse“ koordinieren einerseits die methodischen Kompetenzen sowie die Geräteinfrastruktur innerhalb des ZeHS, insbesondere für die geplanten Zentrallabore „Physikalische und Chemische Analytik“. Außerdem begleiten sie Verbundforschungsvorhaben mittels betriebswirtschaftlicher Methoden. Sie fungieren andererseits als Schnittstellen für die Integration der an den Instituten der TU BAF 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 Materialtechnika

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

Die Bauphase des Forschungsbaus umfasste die Jahre 2016 bis 2020. Er liegt zentral auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg an der Winklerstraße. Die Gesamtkosten von 41,51 Mio. € teilen sich in Baukosten (28,67 Mio. €), Kosten für die Anschaffung von Großgeräten (9,75 Mio. €) und Kosten für die Erstausrüstung (3,09 Mio. €) auf. Das Gebäude umfasst eine Gesamtfläche von 6.011 m<sup>2</sup>, welche u. a. Büroräume, Laborflächen, Versuchshallen und einen Seminarraum einschließt. Die organisatorische Verantwortung für die

Planung, Nutzung und den Betrieb des Forschungsbaus lagen seit der ersten Antragstellung im Jahr 2013 bei Prof. Dirk C. Meyer als Wissenschaftlichem Sprecher und dem Vorstand des ZeHS. Zur Mitte des Jahres 2020 wurden Frau Dr. Barbara Abendroth und Frau Ass. iur. Theresa Lemser, die beide langjährig mit besonderer Initiative für das Vorhaben wirkten, als Hausdirektorin bzw. Referentin des ZeHS entfristet. Für den anlaufenden Betrieb bildet der Wissenschaftliche Sprecher gemeinsam mit den beiden Direktoren Prof. Dr. Bernd Meyer und Prof. Dr. Edwin Kroke das Direktorium des ZeHS. Inzwischen liegt der Fokus der Arbeiten in besonderer Weise auf interner und externer Vernetzung, der Anbahnung von Verbundforschungsvorhaben sowie dem weiteren Ausbau der Geräteinfrastruktur.

Während der Bauzeit wurden durch das Institut für Experimentelle Physik personelle und materielle Ressourcen für die Detailplanung und praxisgerechte Entwicklung initiativ bereitgestellt.

Der Bau des ZeHS auf dem Wissenschaftskorridor in Freiberg ging rasch voran, lediglich der Abschluss einzelner Arbeiten musste auf dem Hintergrund der gegebenen Situation für Anfang 2021 vorgesehen werden. Am 22. März 2019 wurde das Richtfest für das Forschungszentrum begangen (siehe Abbildung 3). Die Übergabe an die Nutzer erfolgt zu Beginn des Jahres 2021.

Die nachfolgenden Texte zu Architektur und Kunst am Bau wurden in enger Anlehnung an am ZeHS ausliegenden Faltblatt-Informationen in Abstimmung mit den Urhebern verfasst. Weitere Informationen zu adäquat aufbereiteten Kurzfassungen zur Gliederung und zur Forschungsprogrammatik sowie laufenden Forschungsaktivitäten erhalten Sie unter [www.zehs-freiberg.de](http://www.zehs-freiberg.de) sowie auf Anfrage an [theresa.lemser@zehs.tu-freiberg.de](mailto:theresa.lemser@zehs.tu-freiberg.de).

## Architektur

### Ein Ort wissenschaftlicher Zusammenarbeit

Die Innovationskette der Forschungsprogrammatik des ZeHS bildet sich im Neubau auch architektonisch ab. Die Büros, die Labore und die Versuchshalle sind in separaten Gebäudeteilen untergebracht (siehe Abbildungen 4 bis 6). Sie folgen der städtebaulichen Leitidee des „Wissenschaftskorridors“ und fügen sich durch ihre abgestufte Geschossigkeit in den Maßstab des Campus ein.



**Abbildung 4:** Kopfbau des ZeHS

Die einzelnen Kettenglieder sind in ihrer Abfolge räumlich – und übergeordnet auch gedanklich – miteinander verbunden.

Aus den Denkkzellen im Kopfbau gibt es Sichtbeziehungen auf alle tiefer liegenden Teile des Hauses bis in die Versuchshalle hinein und umgekehrt. Die effiziente, flexible Unterteilung des Raumprogrammes in Labor, Versuchshalle und Büro ermöglicht durch kurze Wege und Aufweitungen an hoch frequentierten Bereichen die Nutzung des ZeHS als Forschungs- und Austauschort für alle Fakultäten.

### Energie aus Freiburger Tradition

In die Gestaltung des Hauses sind viele Assoziationen aus dem Bergbau und dem Montanwesen eingeflossen. Wie ein aufgespaltenes Mineral, dessen äußere steinerne Hülle den inneren kristallinen Kern schützt, liegt der Neubau topographisch geschichtet am Wissenschaftskorridor. Der Neubau übersetzt das Karge und Schroffe der bergbaulichen Hütten und Halden in ein gestalterisches Gesamtkonzept und verortet sich damit auf dem Campus der Bergakademie und im Herzen der Bergstadt Freiberg.

### Wurzeln und Herausforderungen

Der Neubau mutet von außen durch seine steinerne Fassade aussagestark und kräftig an, gleichwohl geht die



**Abbildung 5:** Laborgang im ZeHS

Fassade durch die ablesbare Schichtung der Geschosse sensibel mit den topographischen Verhältnissen um und lässt durch die regelmäßig, präzise gesetzten Fenster eine behütete Nutzung vermuten. Im Inneren entfaltet sich Wärme und zurückhaltender Glanz. Der räumliche Kontrast zwischen dem großzügigen Atrium und den engen, stollenartigen Gängen knüpft erneut an die Bergbautraditionen des Ortes an. Alle diese Räume umkreisen den Kern des Hauses – einen Innenhof – der gefasst wird mit Farben, die von sehr hellen über leicht rosafarbene bis zu sehr dunklen Violett-Tönen an Amethyste erinnern (siehe Titelbild). So wird der abgeschlossene Hof räumlich zur verbindenden Mitte des Hauses, um die sich das gesamte Wirken des Zentrums bewegt.

Die Materialien und Farben der Innenausbauten folgen diesen Themen ebenso: In den Büros, wo die „hohe Theorie“, die übergeordnete Planung der Dinge, passiert, kommen helle, glatte Oberflächen zum Einsatz. Die feine, praktische Arbeit in den Laborflügeln wird visuell in das Thema „Stollen“ übertragen und findet seine Entsprechung in bronzefarbenen, erdigen Tönen für Türen, Treppengeländer, Fenster oder Profile der Innenraumverglasungen. Die Teeküchen mit den Eichenverkleidungen interpretieren die „Schutzhütten“ in den Bergbaustollen. Die robuste Versuchshalle, in der die groben, gewichtigen Arbeiten stattfinden, ist gestalterisch durch rohe



**Abbildung 6:** Technikumschale des ZeHS

Materialien, wie Beton, Estrich oder verzinktes Metallblech, bestimmt.

## Kunst am Bau

Der Entwurf „Solaris“ wurde im Rahmen des vom Sächsischen Staatsministerium der Finanzen ausgelobten Wettbewerbs Kunst am Bau für das ZeHS ausgewählt. Mit diesem Instrument fördert der Freistaat auf Grundlage seines baukulturellen Anspruchs die zeitgenössische, bildende Kunst, indem er bei Großen Baumaßnahmen Aufträge an bildende Künstler vergibt. Hierfür wird bei geeigneten Bauwerken ein Teil der Kosten bereitgestellt. Die ausgewählten Kunstwerke sollen dauerhaft fest im Inneren oder außerhalb der Gebäude mit diesem verbunden sein.

Im Verfahren wurde der Freistaat Sachsen durch den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement, Niederlassung Chemnitz (SIB) vertreten; die Wettbewerbsbetreuung übernahm das Architekturbüro Eßmann | Gärtner | Nieper | Architekten GbR. Am 6. November 2019 wählte die Jury, der neben Künstlerinnen und Künstlern auch Vertreterinnen und Vertreter des Staatsministeriums für Wissenschaft, Kultur und Tourismus, des SIB, der TU Bergakademie Freiberg und des den Bau verantwortenden Architekturbüros Heinle,

Wischer und Partner Freie Architekten angehörten, das nunmehr installierte Werk „Solaris“ aus. Für die Entscheidung spielten insbesondere die künstlerische, gestalterische Idee, die konzeptionelle Schlüssigkeit wie auch die technische und finanzielle Realisierbarkeit innerhalb des Kostenrahmens eine wichtige Rolle.

### Solaris

Nachfolgend kommt der Künstler Axel Anklam zu Wort:

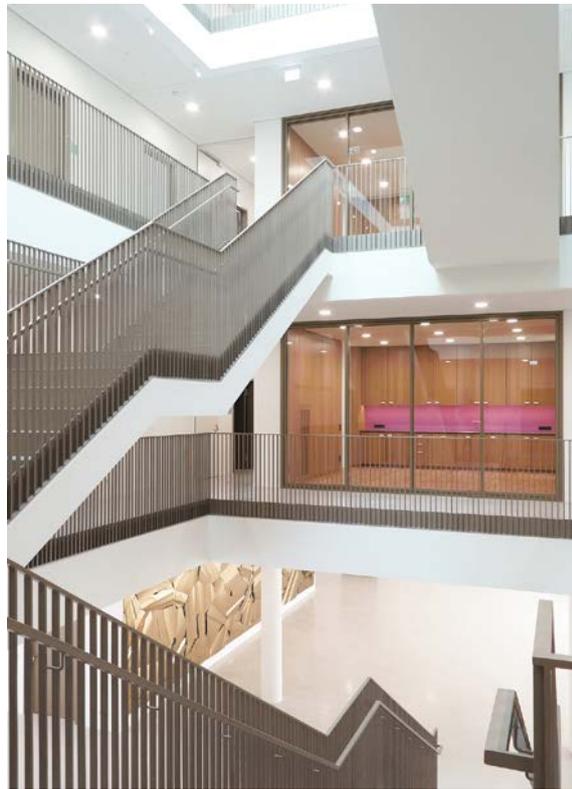
Licht und Bewegung sind fundamentale Bestandteile unserer Erde und damit Gegenstand der Wissenschaft. Das Licht zum bildnerischen Medium zu machen – dieser Gedanke war Ausgangspunkt des künstlerischen Entwurfs Solaris für den Neubau des ZeHS an der TU Bergakademie Freiberg.

Was sehen wir? Goldene Lichtreflexe bedecken die Wände des Foyers. Von einer großflächigen goldschimmernden und partiell hellstrahlenden Wand wird der Besucher des Forschungsbaus empfangen. An deren goldverspiegelter Oberfläche einer vielfach gebrochenen Reliefstruktur wird ein Lichtstrahl reflektiert. An der Brechung des Lichtstrahls entstehen unzählige Reflexionen. Woher kommt das Licht?

Folgt der Blick des Betrachters dem Lichtschein, wird er schnell gewahr, dass dieses Licht im Lichtschacht des Treppenhauses eingefangen und über mehrere Spiegel durch das Treppenhaus ins Foyer geleitet wird (siehe Abbildung 7). In der Tat ist es das Sonnenlicht, welches gebündelt ins Innere übertragen wird. Der so gerichtete Lichtstrahl teilt sich prismenartig auf der fragmentarisch gebrochenen Metalltextur (siehe Abbildung 8).

Ausgehend vom Erbe des Ortes Freiberg mit seiner Erzbergbaugeschichte, der Gewinnung von Edel- und Buntmetallen und deren Verhüttung, hat die Weiterentwicklung der Technologie folgerichtig zur Idee des Forschungsneubaus der TU Bergakademie Freiberg geführt. In den Laboren kumuliert das Wissen um die chemische und physikalische Analytik der Werkstoffe in der Hochtemperatur-Stoffwandlung. Hier versuchen Wissenschaftler, heutige Fragestellungen der Energieumwandlung aus dem Blickwinkel des Umweltschutzes und der Verantwortung für den Planeten mit neuen Ideen und Techniken zu beantworten.

Die Arbeit Solaris kann als Abbild des Prozesses dieser Grundlagenforschung angesehen werden. Im Versuchslabor werden mit Hilfe von Solarenergie chemische



**Abbildung 7:** Treppenhaus im Kopfbau des ZeHS

Prozesse im Bereich der Hochtemperatur in Gang gesetzt. Die Kunst stellt hier eine Analogie dazu her: Sie benutzt das Licht als Sinnbild und Symbol für Erkenntnisgewinn. Dieses wird von Außen ins Innere geholt. Gleich einem Lichtmikroskop bringt die Kunst den Kern des Gebäudes zum Leuchten und folgt so den Grundgedanken der Alchemie: die Untersuchung der Umwandelbarkeit (Transmutation) von Elementen, in diesem Fall von Metallen.

Wie alchemistisches Gold, durch das Licht energetisch aktiviert und gebrochen in der Oberfläche, zeigt das Edelstahlrelief eine abstrahierte Übersetzung der mikroskopischen Aufnahme seiner selbst: Ein kristallines Gefüge aus dem Blickwinkel der Metallographie. Übersetzt ist hier ausschnitthaft die Struktur eines austenitischen Gefüges der Edelstahllegierung Cr-Ni 17-12 in 5000-facher Vergrößerung. Trifft das Licht auf diese Reliefs, lassen die tausendfachen Reflexionen den Raum in einem auratischen Licht erstrahlen. Es entstehen neue Licht-Bezugspunkte, welche in ihrer Modulation den Raum neu definieren.

In Erinnerung an die Kunst des „ZERO“ ruft das sich kontinuierlich verändernde Licht zwischen sonnigem und wolkenbedecktem Himmel ein lebendig komplexes Gefüge von sich überlagernden, prismatischen Spiegelungen hervor. Das Licht gestaltet den Raum, so dass dieser mit den sich in der Wandoberfläche spiegelnden Menschen und der Umgebung zu einer nahezu immateriellen Konsistenz verschmilzt.

Fehlt das Licht von außen, ist der Betrachter gefordert. Je nach seinem Standpunkt wandeln sich die Reflexionen im Relief. Ein immer neues Gefüge baut sich auf. Diese wechselnde Erscheinung sensibilisiert einerseits den Betrachter und motiviert ihn zur Selbstreflexion, andererseits lenkt es dessen Aufmerksamkeit auf das Phänomen und die Kraft der Sonne in einer modellhaften Situation. Der Neubau erfüllt somit auf ästhetische Weise die Erwartung an ihn als einen Raum der Erfahrung und des Denkens.

### Spiegel

Das Sonnenlicht wird mit Hilfe einer Folge von runden Spiegeln über den Luftraum des Treppenhauses in das Foyer geleitet. Hierbei bekommt Spiegel Nr. 1 die Funktion, das Sonnenlicht einzufangen und in entsprechendem Winkel an Spiegel Nr. 2 weiterzuleiten. Dafür wird am ersten Spiegel ein *Solar-Tracking-System* montiert, welches die Sonnenposition aufnimmt und diese über zwei Linearaktuatoren (Stellmotoren) auf die Spiegelposition überträgt. Die Spiegelflächen haben einen Durchmesser von 45 cm. Die Spiegel 2 bis 5 sind fest installiert und bleiben nach einmaligem Ausrichten in der jeweiligen Position.

### Relief

Das Relief, bestehend aus ca. 30 Teilstücken, wurde auf der großen Eingangswand (ca. 3 m × 10 m) im Foyer des ZeHS installiert. Die einzelnen Reliefs sind aus 0,8 mm dickem, hochpolierten, titanoxidbeschichteten Edelstahlblechen gefertigt. Das Aufkanten der Fläche erfolgte im kalten Zustand. Für jede einzelne Biegung galt es, ein passgenaues Werkzeug anzufertigen, um die komplex verlaufenden Feldlinien auf das Blech zu übertragen. Zur Anwendung kam eine teils technische (nämlich lasergeschnittene), teils rein handwerkliche Freiformtechnik, um die selbstverständlich erscheinenden Verläufe der Falten und Krümmungen zu erzeugen. Die Reliefs wurden



**Abbildung 8:** Das Kunstwerk „Solaris“ im Atrium des ZeHS

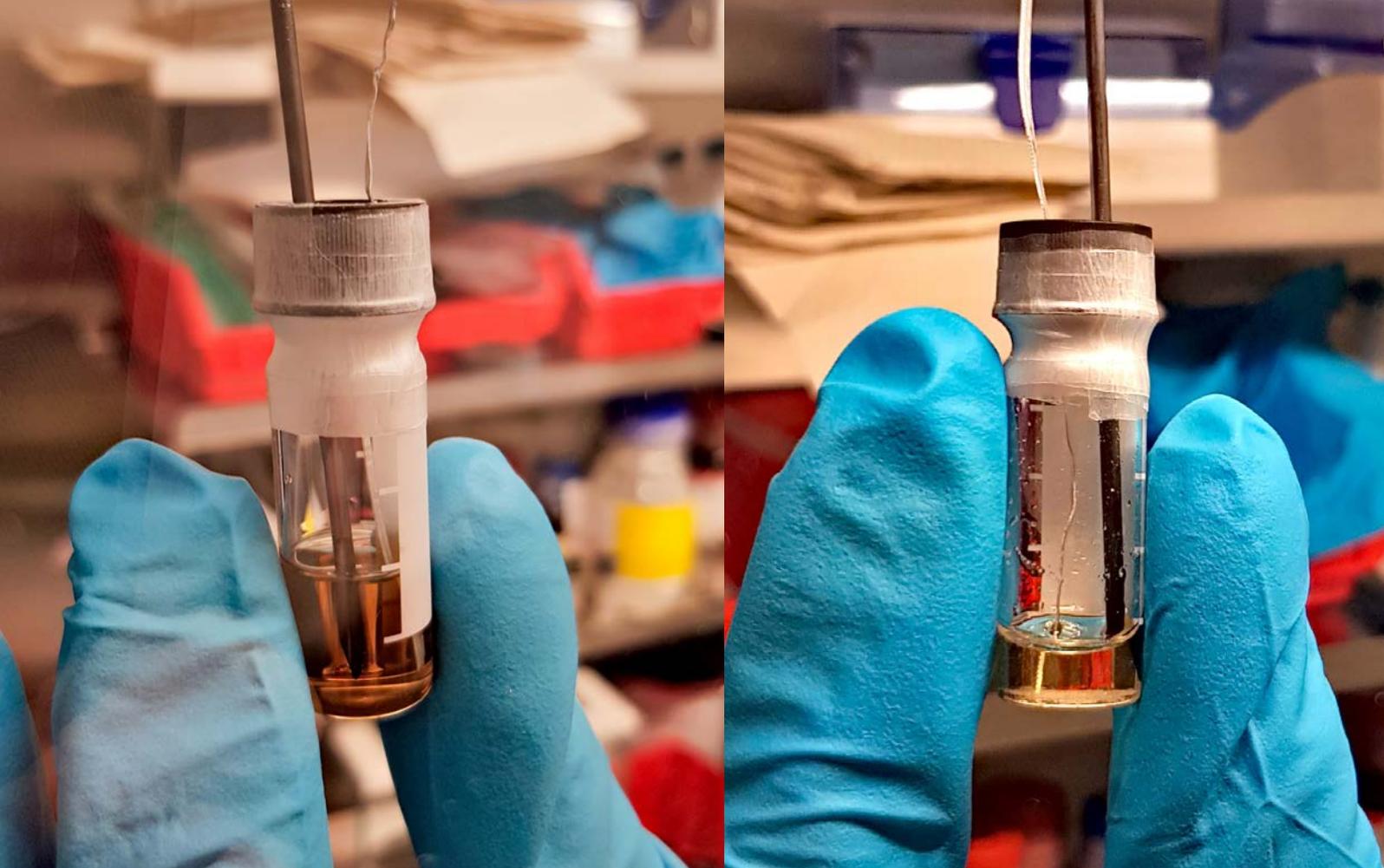
rückseitig großflächig mit Haftblechen aus Aluminium verklebt, die zur Aufnahme von Schrauben dienen, nacheinander vor Ort an der Wand zusammengesetzt und mittels verdeckter Schrauben befestigt.

Jedes Teilstück hat ein Gewicht von maximal 13,5 kg und ist mit vier Haltepunkten in der Wand verankert. Die Oberfläche zeichnet sich durch eine hohe Härte und Witterungsbeständigkeit aus. Hier entsteht der atmosphärische Grundton eines warmen Metallglanzes, der abhängig vom Standpunkt und von der Bewegung des Betrachters in seiner Farbigkeit changiert. Der Umraum setzt sich als Spiegelbild in der Vielzahl der gebrochenen und leicht gekrümmten Flächen neu zusammen.

### Danksagung

Maßgeblich unterstützt bei der Arbeit an Solaris wurde Axel Anklam von seinem Freund und Kollegen Thomas Henninger, mit dem er ein gemeinsames Büro betreibt ([www.anklam-henninger.de](http://www.anklam-henninger.de)). Neben der Mitwirkung an den Entwürfen realisierte Thomas Henninger die Programmierung und Konstruktion der Spiegelmechanik. Die Bauleiterin von Seiten der Nutzer, Mandy Schön, dankt im gemeinsamen Austausch mit Prof. Dr. Dirk Meyer den Künstlern für den wunderbaren Ausdruck des Gebäudes, der Besucher einnimmt und in die Forschungszusammenhänge führt.

# PROJEKTE



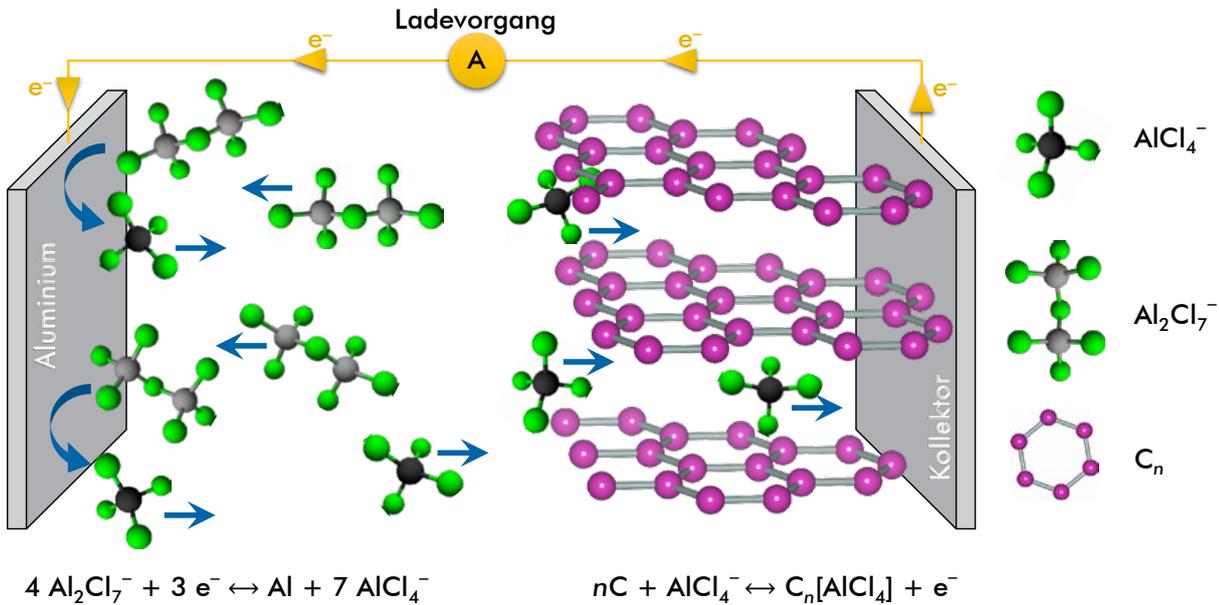
## DIE ALUMINIUMBATTERIE: HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE INDUSTRIELLE FERTIGUNG

Das BMWi-Verbundprojekt „Die Aluminiumbatterie: Herausforderungen für die industrielle Fertigung – ProBaSol“ verfolgt das Ziel der Implementierung einer neuartigen Technologie zur Fertigung elektrochemischer Energiespeicher als Alternative zu Li-basierten Batteriesystemen. Dabei soll es innerhalb der Arbeitsgruppe Prof. Meyer von den Ergebnissen eigener abgeschlossener bzw. aktuell laufender Verbundvorhaben profitieren und den systematischen Aufbau einschlägiger Kompetenzen im Sinne eines Transfers vervollständigen. Schwerpunktmäßig wird auf eine Festkörperbatterie für mobile hochvalente Ionen sowie die dazugehörige Fertigungstechnologie für Festkörperelektrolyte und Elektroden, insbesondere mittels Kurzzeittempern mit Blitzlampen sowie anodischem Oxidieren gesetzt. Wesentliche Vorteile sind die erzielbaren Energiedichten, die hohe Sicherheit, die umfassende Verfügbarkeit der Materialien sowie die Recycelbarkeit der Systeme. Im Ergebnis soll neben einer detaillierten Komponente-Eigenschaft-Matrix sowie Zellstudien, ein Prototyp in Einsatzumgebung als Voraussetzung für die



industrielle Fertigung vorliegen. Die volumetrische Energiedichte kann potentiell doppelt bis viermal so hohe Werte im Vergleich zu kommerziellen Li-Ionen-Batterien erreichen. Zudem ist ein Kostensenkungspotential von bis zu 20 % bezogen auf den Preis pro kWh gegeben. Das Erreichen der Ziele soll durch begleitendes Technologiemanagement und Systemanalyse unterstützt werden.

Die Arbeiten wurden planmäßig im Januar 2020 aufgenommen, wobei das Vorläuferprojekt R2R-Battery eine ideale Katalysesituation bot. Projektpartner der AG Meyer sind die FROLYT Kondensatoren und Bauelemente GmbH, die ROVAK GmbH, das Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) sowie das Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen (FILK).



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Ladevorgangs einer Tetrachloroaluminat-Graphit-Batterie mit nichtwässrigem Elektrolyten

Eine Herausforderung bei der Verwendung von Aluminiummetall als Elektrode in wässrigen Zellen ist die inerte Oxidschicht. Die schnelle und irreversible Bildung dieser passivierenden Schicht mit hoher elektrischer Bandlücke auf Aluminium verhinderte bisher alle Bemühungen, wässrige elektrochemische Zellen auf Al-Basis mit hoher Reversibilität zu realisieren. Um dieses Problem zu lösen, werden zum einen nichtwässrige Elektrolyte eingesetzt (siehe Abbildung 1) und zum anderen kommt eine Vorbehandlung der Al-Oberflächen zum Einsatz, um mit wässrigen Elektrolyten arbeiten zu können.

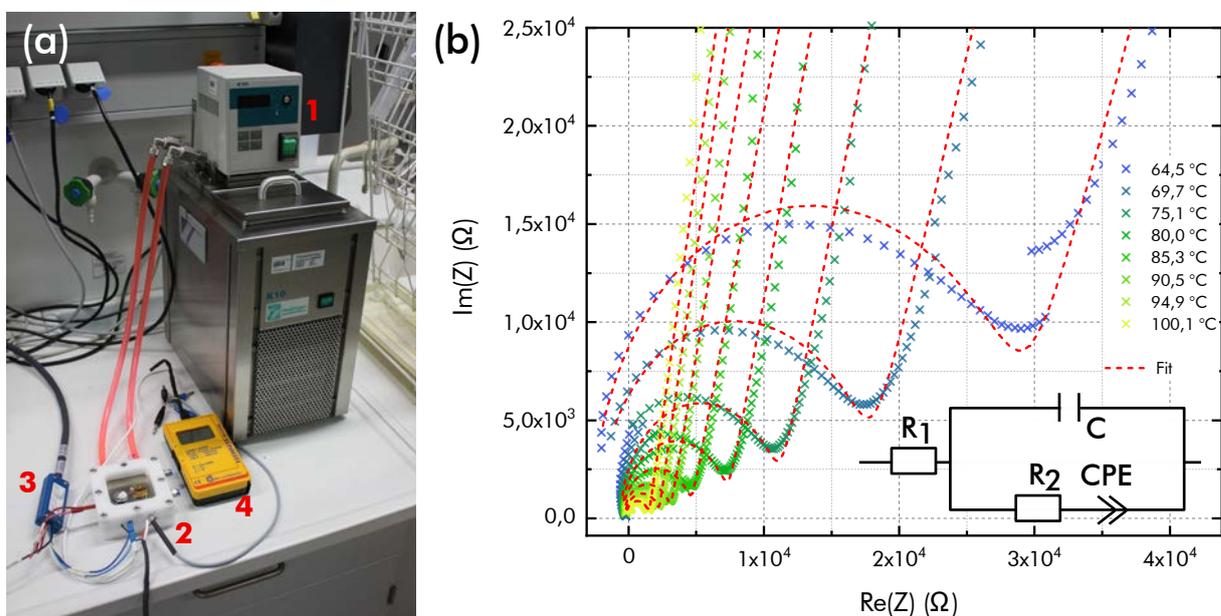
Die gute Löslichkeit der meisten Aluminiumsalze im Wasser macht die wasserlöslichen Polymere zu vielversprechenden Kandidaten zur Realisierung von Polymer-Festelektrolyten für Aluminium-Ionen-Batterien. Polyvinylalkohol (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O, PVA) ist ein thermoplastischer Kunststoff, der eine gute Wasserlöslichkeit besitzt, vor allem bei niedrigeren Polymerisationsgraden. Beim Partner FILK wird die Synthese weiterer Polymer-Elektrolyte mit gelösten Aluminiumsalzen versucht.

Aus der Literatur ist ein neuer wasserfreier AlCl<sub>3</sub>-PVDF-Polymerelektrolyt bekannt, dessen ionische Leitfähigkeit durch das molare F/Al-Verhältnis einstellbar ist. Hinsichtlich der Anforderungen an eine Batterie wurde das molare Verhältnis für den Polymerelektrolyten

ausgewählt, welches die höchste ionische Leitfähigkeit aufweist. Der wasserfreie Polymer-Festelektrolyt besteht aus der Salzkomponente AlCl<sub>3</sub> und der Polymerkomponente PVDF. Da AlCl<sub>3</sub> stark hygroskopisch ist, wurde die Synthese ausschließlich in der Glovebox durchgeführt (H<sub>2</sub>O- und O<sub>2</sub>-Gehalt < 0,1 ppm).

Für die elektrochemische Charakterisierung wird die synthetisierte Polymerfolie, mit einem Durchmesser von 10 mm, zwischen Aluminium-Elektroden in eine CR2016-Knopfzelle gepresst. Diese wird mittels Impedanzspektroskopie hinsichtlich ihres Leitfähigkeitsverhaltens untersucht. Hierbei wird ein temperierbarer Messplatz (siehe Abbildung 2), welcher aus einem Badkryostaten und einer Messkammer besteht, eingesetzt. Die Messkammer wird mittels des Badkryostaten temperiert. Zusätzlich befindet sich ein Peltier-Element in der Messkammer, um zusätzlich Temperaturunterschiede von ±50 K erreichen zu können. Die Knopfzelle wird mit Silberleitlack in die Messkammer eingeklebt und kontaktiert. Die Impedanzspektren werden mit einem Potentiostaten Biologic SP300 bei verschiedenen Temperaturen im Bereich von 64 °C bis 100 °C in 5 °C-Schritten (siehe Abbildung 2) gemessen.

Die temperaturabhängigen Spektren zeigen einen Halbkreis, an den sich eine Gerade anschließt. Ziel der

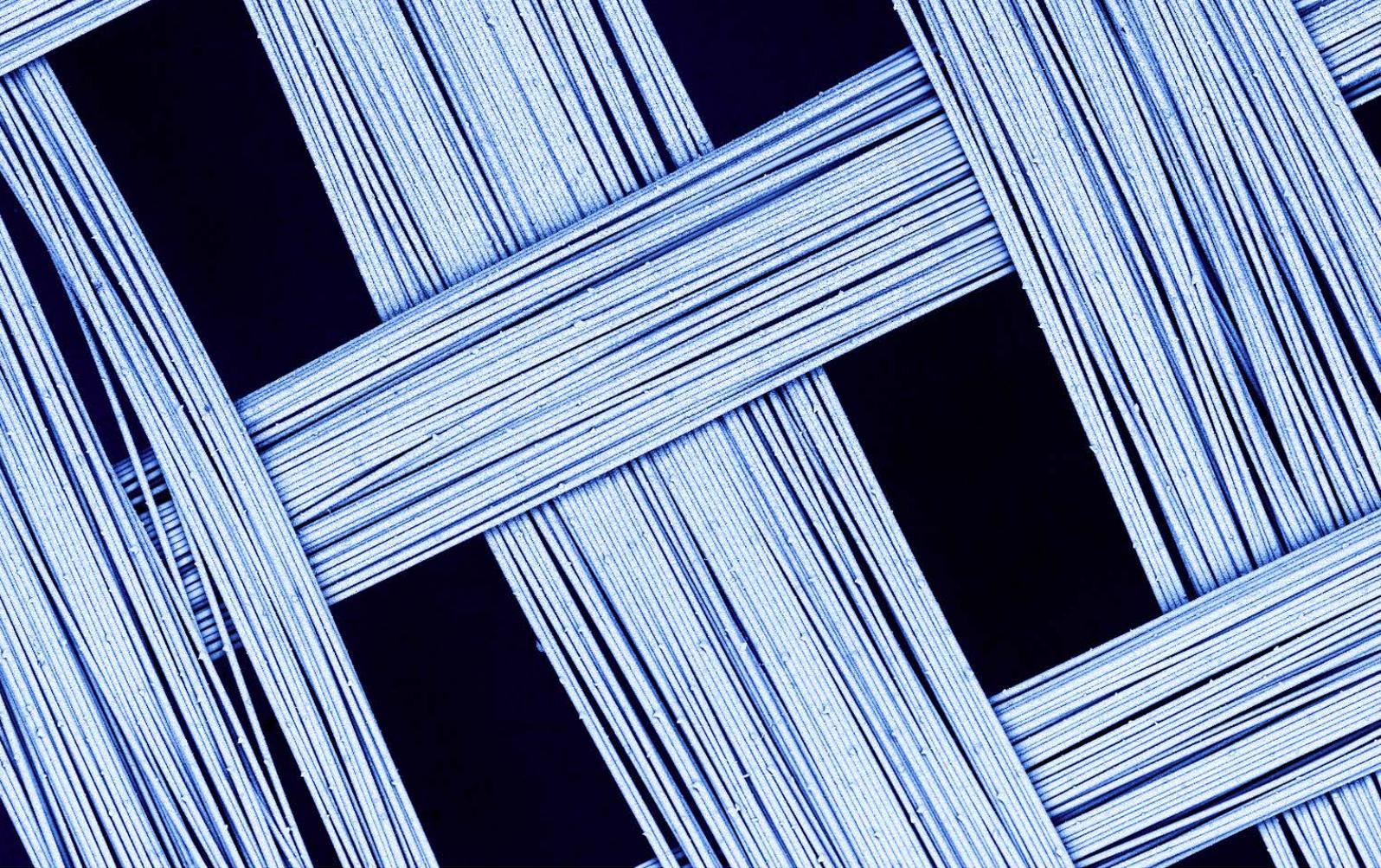


**Abbildung 2:** Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) am  $\text{AlCl}_3$ -PVDF-Polymerelektrolyten. (a) Messplatz zur temperaturabhängigen EIS-Messung, bestehend aus: Badkryostat (1), isolierter Messkammer (2), Potentiostat (3), Thermoelement zur Temperaturüberwachung (4); (b) EIS-Spektren des Polymerelektrolyten bei verschiedenen Temperaturen. Im Einschub wird das verwendete Ersatzschaltbild zum Anpassen der EIS-Daten gezeigt.

Analyse ist es, den Schnittpunkt des Halbkreises mit der x-Achse zu ermitteln, da dieser dem Widerstand des Polymers entspricht. Hierfür werden die Spektren mittels eines Ersatzschaltbildes (siehe Einschub in Abbildung 2) angepasst. Das gewählte Ersatzschaltbild setzt sich aus zwei Einzelwiderständen  $R_1$  und  $R_2$ , einem Kondensator-Element  $C$  und einem *Constant Phase Element*  $CPE$ , welches einen nicht-idealen Kondensator für eine elektrochemische Doppelschicht und dessen Kapazität beschreibt, zusammen. Aus dem ermittelten Widerstand  $R_2$  wird die spezifische Leitfähigkeit des Polymers bestimmt und über der Temperatur aufgetragen. Aus dieser Darstellung kann über den Arrhenius-Zusammenhang die Aktivierungsenergie  $E_A$  der mobilen Spezies bestimmt werden. Diese beträgt  $E_A = (0,88 \pm 0,01)$  eV. Dieser

Wert ist im Vergleich zu anderen bekannten Polymerelektrolyten, wie sie in Lithiumbatterien zur Anwendung kommen, sehr hoch. Li-Polymere wie PEO-LiTf-EMITf zeigen eine Aktivierungsenergie von ca. 0,3 eV. In anderen Systemen, wie Mg-PVA-Polymerelektrolyten, wurden Aktivierungsenergien von 0,67 eV gefunden.

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Übernahme der Finanzierung des Projektes (Förderkennzeichen: 03EI3014A).



---

## FOLIENARTIGE, RESSOURCENEFFIZIENTE, GEWEBEBASIERTE STROMKOLLEKTOREN FÜR LITHIUM-IONEN-ZELLEN

Die Arbeitsgruppe Energiematerialien des Instituts für Experimentelle Physik (AG Prof. Meyer) wird in den nächsten zwei Jahren gemeinsam mit dem Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden und der elfolion GmbH als Projektleiter an der „Entwicklung von folienartigen, ressourceneffizienten, gewebebasierten Stromkollektoren für Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen hoher Energie- und Leistungsdichte aus feinsten Glasmultifilamentgarnen und Metalldrähten“ arbeiten. Das Projekt LilonSK (ZF4751502JO9) wird durch das „Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand“ finanziert. Am 5. August 2020 fand das Kick-off-Meeting bei elfolion in Quedlinburg statt (siehe Abbildung). Dort wurde den Projektpartnern auch die patentierte Beschichtungstechnologie von elfolion vorgestellt.

Ziel des Konsortiums ist es, neuartige ressourceneffiziente Stromkollektoren für Lithium-Ionen-Zellen zu entwickeln, herzustellen, hochzuskalieren und zu verifizieren, die eine um 15% höhere Energie- und

Leistungsdichte im Vergleich zu konventionellen Zellen ermöglichen und dabei 85% weniger Metall benötigen. Dazu sollen Drehergewebe auf Basis feinsten Multi- und Monofilamentgarne aus Glas, Kohlenstoff, Polymer und Metall entwickelt und deren Herstellbarkeit auf dafür zu modifizierenden Webmaschinen verifiziert werden. In einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren sollen Stromkollektorbänder hergestellt und in einem zweiten Schritt in einem neuartigen Vakuumbeschichtungsverfahren mit Kupfer und Aluminium beschichtet werden, um Ausgangskomponenten für Zellelektroden zu bilden. Diese Stromkollektoren ermöglichen eine dreidimensionale Kombination der elektrisch leitenden und der ionisch leitenden Materialkomponenten, was zu einer Metalleinsparung und verbesserten Anbindung des Elektrodenmaterials führt. Die elektrochemische Performance wird in Pouchzellen-Geometrie charakterisiert.

Der Projektpartner ITM wird die ultraleichten Drehergewebe aus ultrafeinen Glas- und Metallgarnen entwickeln, während elfolion die Stromkollektoren herstellt,



**Abbildung:** Kick-Off-Meeting bei der elfolion GmbH zum Projektstart zu neuartigen Stromkollektoren am 5. August 2020

die dann beschichtet, zu Pouchzellen zusammengefügt und am IEP elektrochemisch charakterisiert werden.

ZIM ist ein Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie mit dem Ziel, die Innovationsfähigkeit des Mittelstands zu stärken. Das ZIM fördert innovative Unternehmen mit Geschäftsbetrieb in Deutschland, die neue Produkte, Verfahren oder technische Dienstleistungen entwickeln oder bestehende deutlich verbessern wollen.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



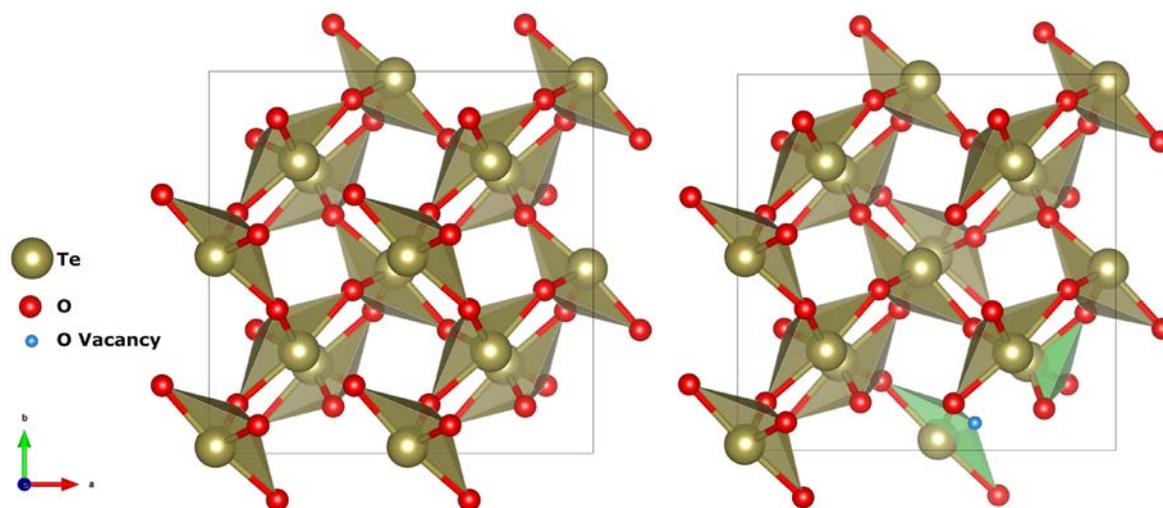
## KONTROLLIERTE EINSTELLUNG DER ATOMSTRUKTUR DURCH AKUSTISCHE WELLEN UND ELEKTRISCHE FELDER

In dem deutsch-russischen Kooperationsprojekt AcoustREXS geht es um die Untersuchung des Einflusses von akustischen Wellen und elektrischen Feldern auf strukturelle Charakteristiken, wie z. B. kleinste atomare Verrückungen und Vakanzmigration in polaren Materialsystemen. Hierdurch werden die physikalischen Eigenschaften gezielt durch die äußeren Einflüsse kontrolliert bzw. geschaltet oder neue Materialeigenschaften erzeugt. Dies geschieht insbesondere durch stehende akustische Druckwellenfelder oder elektrische Potentialgradienten, die die Materialrandbedingungen lokal variieren und Kristallsymmetrien brechen. Die Arbeitsgruppe Prof. Meyer führt gemeinsam mit den russischen Partnern der Lomonossow-Universität Moskau (MSU) resonante Beugungsexperimente am Synchrotron durch und unterstützt im Bereich der theoretischen Modellierung mittels DFT die Auswertung. Die Gruppe um Frau Prof. Dr. Elena Ovchinnikova bringt zudem das Knowhow für die Einkopplung akustischer Wellen in die Materialsysteme mit ein. In dem Projekt wird Herr Dr. Matthias Zschornak bei

**AcoustREXS**

den Modellierungen von Doktorand Christian Ludt und bei den Experimenten durch Doktorandin Tina Weigel unterstützt.

Zu den anfänglichen Kristallsystemen  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  und  $\text{TeO}_2$  kam im Jahr 2020 das Material  $\text{ZnO}$  hinzu. Modelliert werden die Atompositionen für Gleichgewichtsbedingungen unter akustischen bzw. elektrischen Randbedingungen, welche die russischen Partner benötigen um die Spektren für schwache „verbotene“ Reflexe vorherzusagen und zu interpretieren. Der Vergleich mit dem Synchrotronexperiment erlaubt dann die Bewertung von Szenarien für kleine Verrückungen (im pm-Bereich) der Atome in der Einheitszelle. Außerdem werden Modellierungen durchgeführt, um Informationen über Druckinduzierte Symmetrieänderungen in Kristallen zu erhalten, die den russischen Partnern schon vor dem



**Abbildung 1:** Atomistische Struktur von Paratellurit TeO<sub>2</sub> (links) und unter Einbau von Sauerstoffvakanz hervorgerufene lokale atomare Verrückungen (rechts). Durch Migration und Redistribution der Vakanz z. B. im elektrischen Feld, die dynamisch mittels der *Nudged-Elastic-Band*-Methode modelliert wird, sollen durch lokale Symmetriebrechungen die Eigenschaften im Material gezielt eingestellt bzw. räumlich moduliert werden.

Experiment Hinweise zur Durchführung geben. In weiteren Ansätzen stehen Vakanz und deren Migration im Fokus (siehe Abbildung 1). So werden *Nudged Elastic Band* (NEB) Rechnungen durchgeführt, um die energetischen Barrieren für deren Migration im Kristall im elektrischen Feld zu bestimmen.

## Workshop in Moskau

Im Januar 2020 wurde die Arbeitsgruppe vom Projektpartner aus Russland unter Leitung von Prof. Dr. Elena Ovchinnikova für einen fünftägigen Workshop vom 21.01.20 bis 25.01.20 nach Moskau eingeladen. Der Workshop zum Thema „Crystal Phase Transitions due to Electric Fields and Standing Acoustic Waves“ fand an der M. V. Lomonossow-Universität Moskau (LMSU) und am A. V. Shubnikov Institute of Crystallography statt. Ziel des Workshops war sowohl der wissenschaftliche Austausch und die Diskussion erster Ergebnisse sowie der weiteren Bearbeitung der Arbeitspakete, als auch das gegenseitige Kennenlernen aller Projektpartner (siehe Abbildung 2).

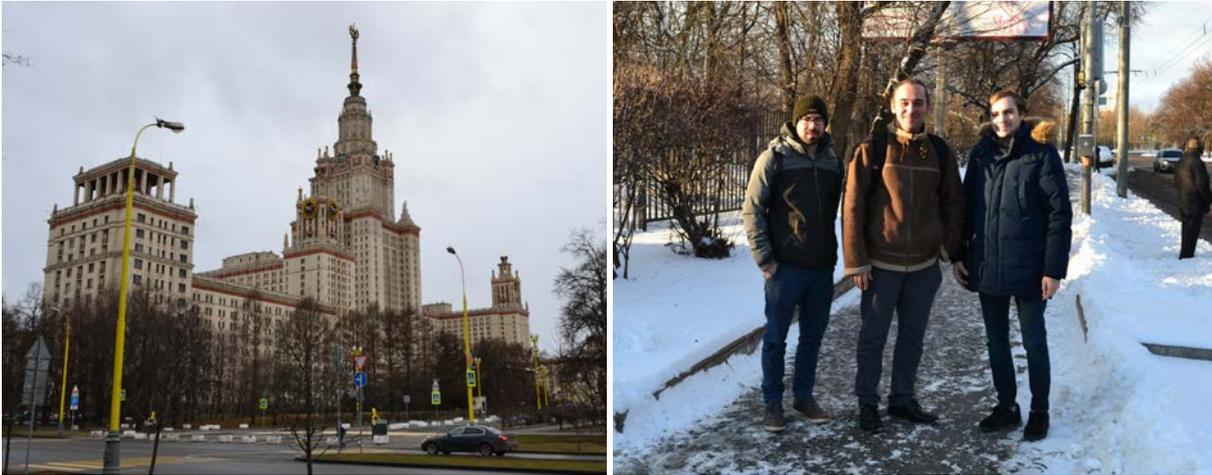
Am ersten Tag des Workshops an der LMSU stand der wissenschaftliche Austausch im Vordergrund. So stellten alle Teilnehmer ihre aktuellen Forschungen in Vorträgen vor. Im Anschluss bekamen Matthias Zschornak,

Christian Ludt und Tina Weigel noch eine kleine Führung durch das Hauptgebäude der Universität inklusive eines Besuchs des geologischen Museums in der Spitze des Turmes des Gebäudes. Am nächsten Tag trafen sich die Teilnehmenden wieder in der LMSU um projektrelevante Themen zu besprechen. Am Abend erfolgte ein Besuch des Balletts Schwanensee im Kreml-Theater-Palast.

Der Workshop wurde am Folgetag am A. V. Shubnikov Institute of Crystallography fortgesetzt. Dort wurden nach einem Rundgang durch das Institut mit Besuch des Museums über A. V. Shubnikov auch die experimentellen Aufbauten, an denen die russischen Projektpartner von AcoustREXS ihre Messungen durchführen, gezeigt. Anschließend wurde über den Fortgang des Projektes diskutiert. Am Abend kamen alle Teilnehmer zum gemeinsamen Essen in einem russischen Restaurant zusammen. Mit Radieschen-Wodka mit Honig wurde auf einen sehr erfolgreichen Workshop angestoßen.

Die letzten Tage des Workshops waren von sozialen Aktivitäten und dem besseren Kennenlernen der Projektpartner geprägt. So zeigten die russischen Partner den Besuchern die Stadt Moskau und organisierten einen Besuch im Kreml-Museum sowie in der Tretjakow-Galerie.

Der Workshop war für alle Teilnehmer ein sehr schönes Erlebnis und hat viele bleibende Eindrücke hinterlassen. In zahlreichen intensiven Diskussionen wurden die



**Abbildung 2:** Hauptgebäude der LMSU im Südosten von Moskau (links) und Treffen mit Anton Kulikov (rechte Person) auf dem Weg zum Shubnikov-Institut (rechts)

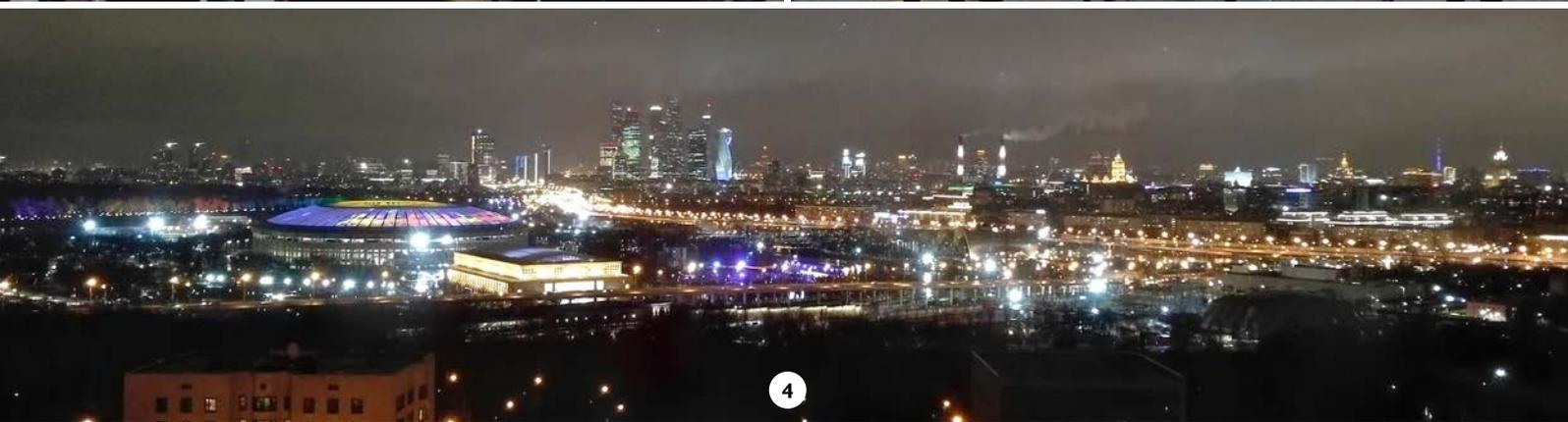
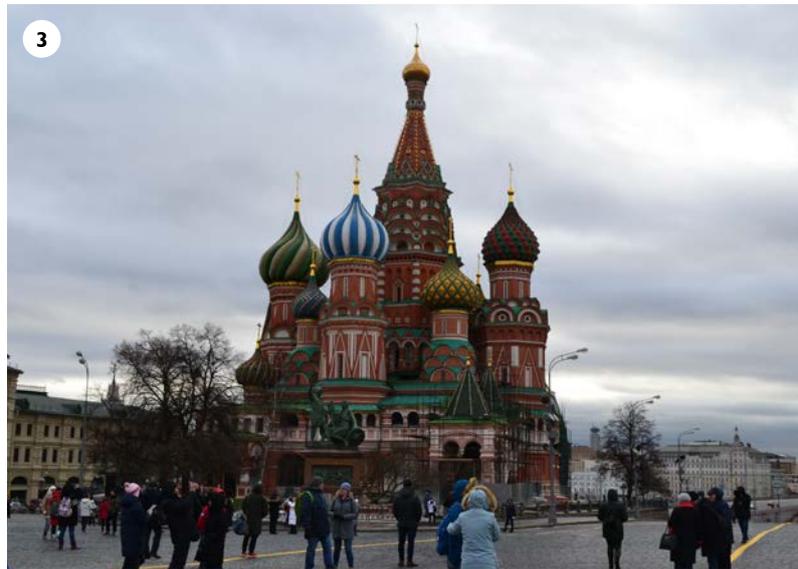
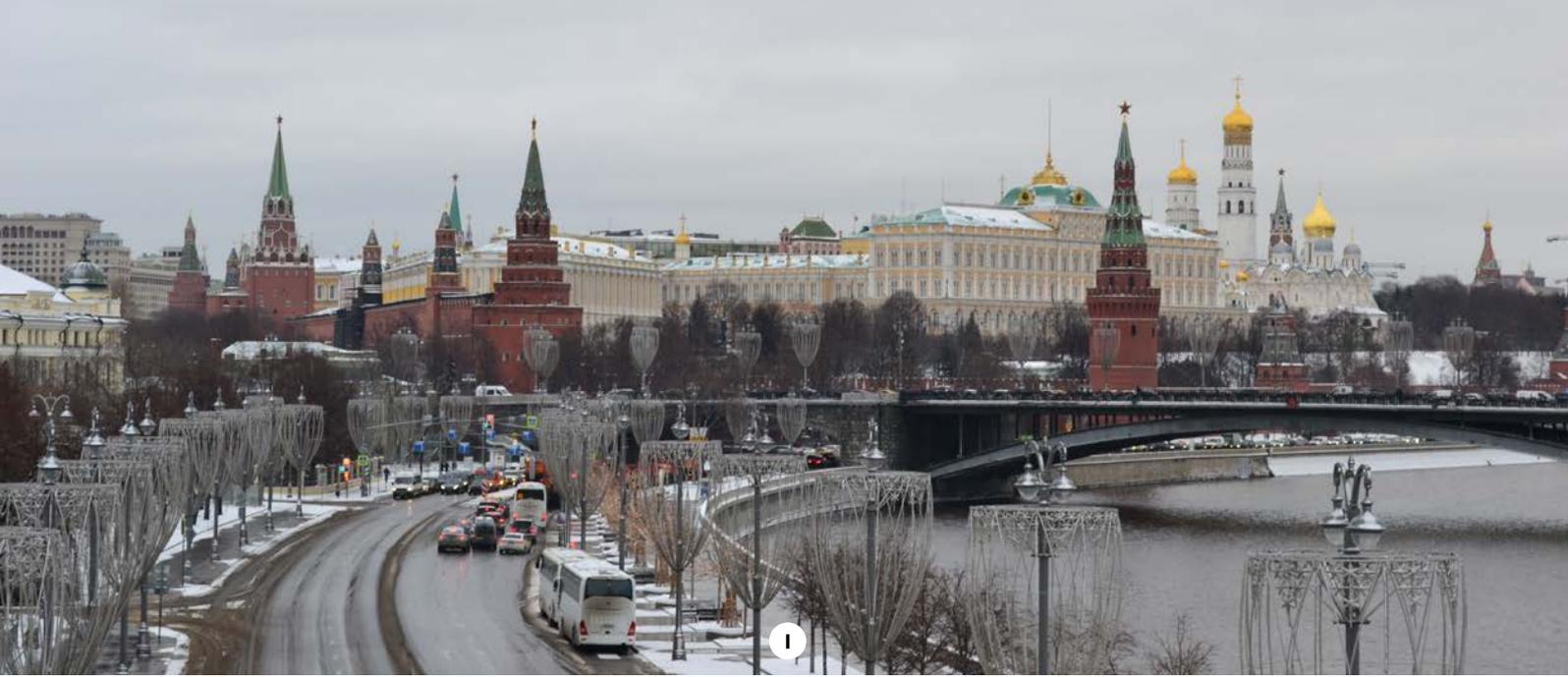
weitere Zusammenarbeit vertieft und gemeinsame Lösungsansätze besprochen. Besonders beeindruckend war die russische Gastfreundschaft, die uns beginnend von der Abholung vom Flughafen und der Begleitung vom Hotel zur Universität bis hin zu gemeinsamen Abendprogrammen einen wundervollen Aufenthalt bereitete.

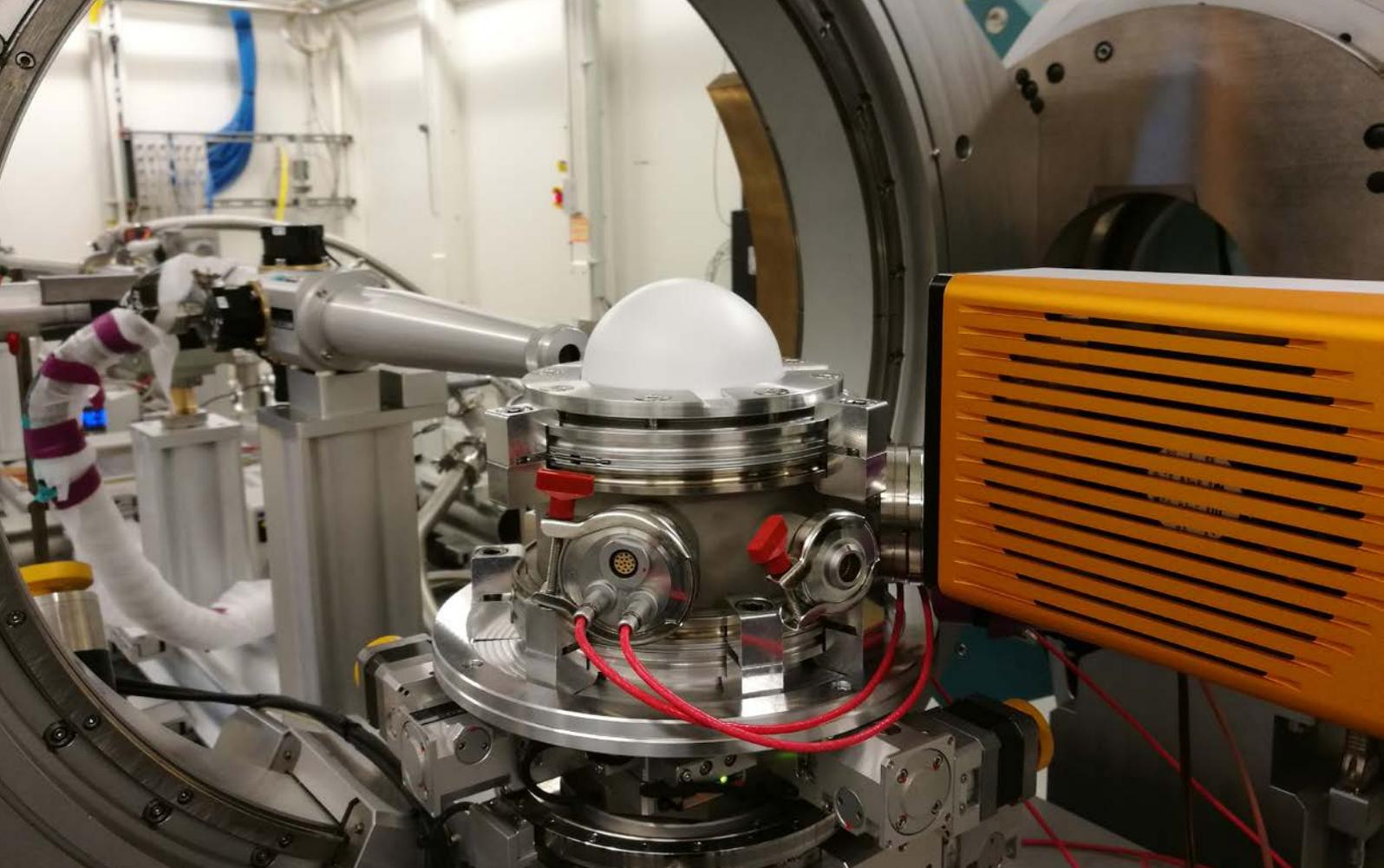
Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Übernahme der Finanzierung des Projektes (Förderkennzeichen: 409743569).

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

**Bilder auf der rechten Seite:**

- 1 Blick zum Kreml
- 2 Stadtführung durch Moskau
- 3 Basilius-Kathedrale
- 4 Blick auf die „Moskau City“ aus Südost
- 5 Weihnachtsmarkt auf dem Roten Platz
- 6 Weihnachtlich geschmücktes Kaufhaus Gum





---

## RESONANTE RÖNTGENDIFFRAKTION UNTER OPTIMIERTER DESTRUKTIVER INTERFERENZ

Das Projekt „Resonante Röntgendiffraktion unter optimierter destruktiver Interferenz zur hochsensitiven Bestimmung phasenaufgelöster lagespezifischer Atomverrückungen in kristallinen Materialien“ (REXSuppress) wurde bis 2020 am Institut für Experimentelle Physik, AG Meyer von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert. Das Projekt basiert auf dem neuartigen Ansatz *Resonantly Suppressed Diffraction* (RSD), mit welchem kleinste Abweichungen der Atompositionen von der Idealstruktur mit Pikometer-Genauigkeit quantifiziert werden können.

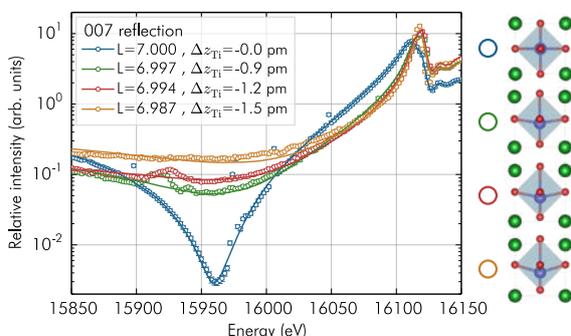
Wie bei allen resonanten Techniken wird das lokale elektronische System einer atomaren Spezies resonant durch gezielt gewählte Wellenlängen des Röntgenspektrums angeregt. Das Besondere der RSD ist der Fokus auf ein Intensitätsminimum nahe der Absorptionskante eines Bragg-Reflexes, welches durch destruktive Interferenz hervorgerufen wird. Dieses Intensitätsminimum ist hochsensitiv auf kleinste Abweichungen der atomaren Ordnung. Somit bietet die RSD-Methode einen innovativen Ansatz für die Charakterisierung von dynamischen Prozessen und Phasenumwandlungen, auch unter dem Einfluss externer Parameter wie Temperatur,

# REXS<sup>UP</sup>PRESS

mechanischer Spannung, sowie elektrischen oder magnetischen Feldern.

Methodisch stellt RSD eine Kombination von Röntgenspektroskopie und -diffraktometrie auf Basis resonanter Effekte dar und ist in den Bereich des *Resonant Elastic X-Ray Scattering* (REXS) einzuordnen. Entsprechende Experimente können nur an Synchrotronstrahlungsquellen, wie dem DESY oder der ESRF, durchgeführt werden.

Der neue Ansatz eignet sich für Fragestellungen aus der chemischen Kristallographie, aber auch aus den Material-, Geo-, Bio- und Umweltwissenschaften. RSD bietet weiterhin auch eine einzigartige Möglichkeit zur Untersuchung von Defekten in kristallinen Festkörpern. Diese Defekte und ihre kristalline Nahordnung bestimmen eine Vielzahl technisch relevanter Eigenschaften. Genaue Kenntnisse und eine exakte Vermessung der Defekte tragen maßgeblich zu einem besseren Verständnis der



**Abbildung 1:** Intensitätsantwort des 007-Reflexes auf atomare Verrückungen induziert in SrTiO<sub>3</sub> durch Einwirkung eines elektrischen Feldes. Im Vergleich zum unbehandelten SrTiO<sub>3</sub> (blaue Kurve) bewirken die Verrückungen eine Verschiebung des Intensitätsminimums und einen deutlichen Anstieg der Intensität. Die Position des Titan-Atoms relativ zum unbehandelten SrTiO<sub>3</sub> (oben) ist in der Legende dargestellt (für eine bessere Visualisierung um den Faktor 10 verstärkt).

Materialien bei und können durch gezielte Modifikation (*Defect Engineering*) bestehende Eigenschaften optimieren oder neue hervorrufen. Somit hat die RSD auch im Bereich der Halbleiterindustrie, insbesondere bei der Datenspeicherung, sowie der elektrochemischen Energiespeicherung eine außerordentliche Bedeutung. Der Ansatz wurde von Dr. Carsten Richter im Zuge seiner Doktorarbeit entwickelt und erfolgreich zur strukturellen Aufklärung der Migrations-induzierten Feld-stabilisierten polaren (MFP) Phase in Strontiumtitanat angewendet (siehe Abbildung 1). Er wurde im renommierten Wissenschaftsjournal *Nature Communications* veröffentlicht.

Im Jahr 2020 führte die Arbeitsgruppe temperaturabhängige RSD-Messungen an der MFP-Phase in Strontiumtitanat zur hochpräzisen Bestimmung der atomaren Verrückungen bei verschiedenen Temperaturen durch, um daraus die Polarisation und den pyroelektrischen Koeffizienten mittels eines semi-theoretischen Ansatzes zu bestimmen (siehe Abbildung 2). Das dazugehörige Synchrotronexperiment wurde aufgrund der Covid-19-Pandemie im Dezember 2020 als Mail-in-Beamtime remote durchgeführt. Hierbei steuerten Matthias Zschornak, Tina Weigel sowie Carsten Richter, welcher die Arbeitsgruppe wieder bei der Geräteansteuerung, Experimentdurchführung und -auswertung unterstützte, die Beamline von zuhause aus. Melanie Nentwich ergänzte das Team vor Ort und kümmerte sich um den experimentellen Aufbau und die Probenpräparation.



**Abbildung 2:** Für die Messzeit am System Strontiumtitanat zur Bestimmung des pyroelektrischen Koeffizienten der MFP-Phase wurden atomare Verrückungen temperaturabhängig vermessen. Die Abbildung zeigt einen formierten Strontiumtitanat-Einkristall in der Nordseekammer. Dünne flexible Drähte vermitteln ein elektrisches Feld von 10<sup>6</sup> V/m zur Formierung und Stabilisierung der Phase.

Im letzten Projektjahr stand die abschließende Datenauswertung der letzten Synchrotronexperimente im Fokus. So wurde erfolgreich die strukturelle Charakterisierung des Materialsystems Yttrium-Mangan-Oxid YMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mit 33 strukturellen Freiheitsgrade auf Pikometer-Genauigkeit durchgeführt, um die Ferroelektrizität in einer Tieftemperaturphase von YMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> verstehen zu können. Der Abschlussbericht wurde im Juni 2020 verfasst. Ein Fachartikel zur Nordseekammer wurde im *Journal of Synchrotron Radiation* kommuniziert. Weitere Manuskripte zur strukturellen Charakterisierung von epitaktisch gewachsenen, ferroelektrischen SrTiO<sub>3</sub>-Dünnschichten und zur strukturellen Analyse des Ursprungs der Ferroelektrizität in der Tieftemperaturphase von YMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sind bereits in Vorbereitung. Zum Abschluss des Projektes blicken alle Beteiligten auf eine äußerst erfolgreiche Bearbeitung zurück. Die Projektziele wurden im erwarteten Umfang erfüllt und die Ergebnisse stießen auf große Resonanz und wurden mehrfach von nationalen und internationalen Konferenzen ausgezeichnet.



## ROLLE-ZU-ROLLE-FERTIGUNG NEUARTIGER POST-LITHIUM-ENERGIESPEICHER

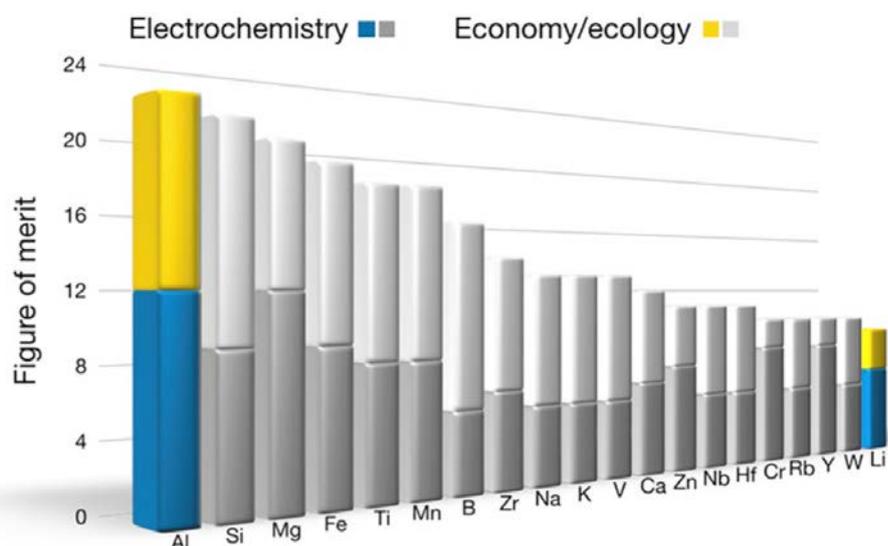
Ziel von R2RBattery ist es, ein Post-Lithium-Energiespeichersystem auf Basis hochvalenter Ionen in Kooperation mit lokalen Industrie- und Forschungspartnern zu entwickeln und maßgeschneiderte Lösungen für deren potenzielle großtechnische Produktion zu erarbeiten. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt arbeiten insgesamt vier Verbundpartner (Fraunhofer FEP Dresden, KSI Meinsberg, Vowalon GmbH Treuen) unter Leitung der TU Bergakademie Freiberg (Koordinator: Prof. Dirk C. Meyer, Projektmanager: Dr. Matthias Zschornak) an der Umsetzung dieser neuen Post-Lithium-Ansätze für die elektrochemische Energiespeicherung. Weitere Partner sind das Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen (FILK) Freiberg, die Froylt Kondensatoren und Bauelemente GmbH Freiberg, die Rovak GmbH, die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien Radeberg und die Cinector GmbH Mittweida.

Die weltweite Nachfrage nach Energiespeichern steigt mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und der wachsenden Anzahl an Elektrofahrzeugen, mobilen Elektrogeräten und stationären Energiespeichern



für das Stromnetz. Im Jahr 2016 wurden weltweit etwa 460 GWh wiederaufladbarer elektrochemischer Zellen produziert. Zurückliegend betrug das jährliche Wachstum des Gesamtmarktumsatzes 8%, der Lithium-Markt wuchs sogar mit 23%. 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. Panasonic) oder koreanische (z. B. LG Chem) Elektronikunternehmen treiben diese Technologie voran, seit einigen Jahren intensiv auch chinesische Unternehmen (z. B. CATL), was die exponentiell steigende Zahl von Patenten ebenso wiedergibt. Deutsche Unternehmen hingegen finden



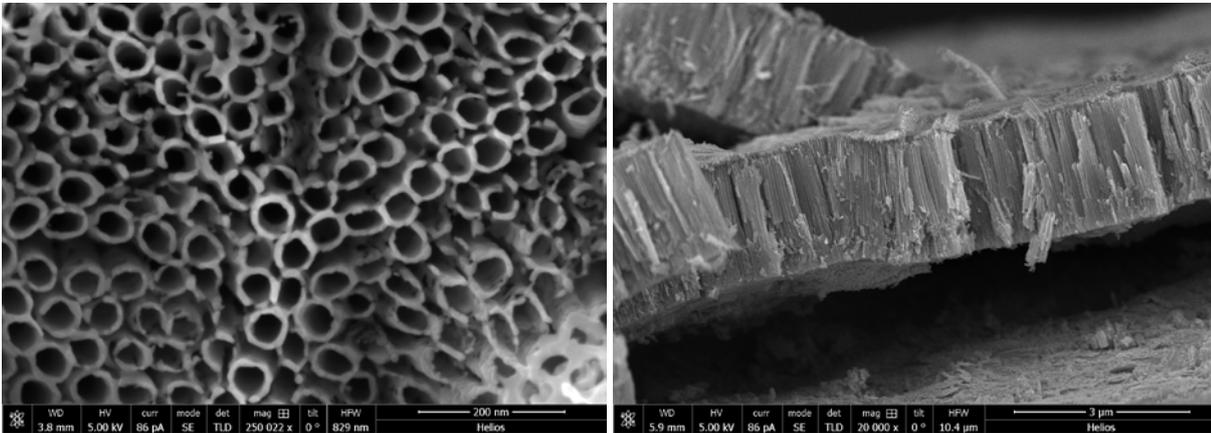
**Abbildung 1:** Ergebnis der Bewertung der Elemente bis Ordnungszahl 94 nach elektrochemischen (dunkle Balken) sowie ökonomischen und ökologischen Parametern (helle Balken). Aluminium steht als negative Elektrode für eine Aluminium-Ionen-Batterie an erster Stelle und ist vergleichend mit Lithium farblich hervorgehoben.

sich nicht unter den Top 10 der Patentanmelder. Um den zukünftigen Bedarf decken sowie den stetig steigenden Anforderungen gerecht werden zu können, sind neue Speichertechnologien und Materialsysteme mit höchsten Energiedichten basierend auf gut verfügbaren Rohstoffen erforderlich. Das Institut für Experimentelle Physik entwickelt dafür im Verbundprojekt R2R-Battery neuartige Post-Lithium-Energiespeicher.

Betrachtet man die Entwicklungen der letzten Jahre, so wird sich der globale Trend der Elektromobilität und der damit einhergehenden Lithium-Ionen-Batterien-Megafactories deutlich auf die Rohstoffnachfrage für wichtige Batterierohstoffe für die Energiespeicherung auswirken. Aktuell findet ein globales Wettrennen zu Batterieprodukten und -technologien statt. So stieg die Anzahl von Lithium-Ionen-Batterie-Megafactories zwischen 2017 und 2019 von ca. 17 auf ca. 70, was einer Zunahme von 289 GWh auf 1.549 GWh entspricht, also etwa 22 Millionen reinen Elektrofahrzeugen. Diese Zahlen verdeutlichen die enorme Nachfrage nach Batterie-Rohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel oder Graphit. Der Bedarf an Lithium wird um das 9-fache steigen, Kobalt um das 6-fache, Nickel um das 5-fache und Graphitanoden um das 9-fache. China hat den Rohstoffnachschub der meisten dieser Stoffe bereits abgesichert. Dies veranschaulicht, dass die Umsetzung der Energiewende, die

elektrochemische Energiespeicher nicht nur für die Elektromobilität, sondern auch für stationäre Anwendungen vorsieht, allein mit der Lithium-Ionen-Technologie kaum möglich sein wird. Deshalb werden zusätzliche alternative Materialsysteme für eine Technologie-Diversifizierung benötigt, auch um Deutschland im Bereich der Energiespeicher wettbewerbsfähig zu halten.

Doch welche Materialien sind dafür sinnvoll? Die Auswahl und Bewertung geeigneter Materialien wurden zurückliegend mit einem in Freiberg entwickelten Bewertungsalgorithmus, der auf einem ausgedehnten Parameterfeld basiert, durchgeführt. Die Bewertungskriterien schließen neben elektrochemischen Parametern, Ressourcenverfügbarkeit, Umweltverträglichkeit, Recycling, Materialkosten und Betriebssicherheit ein. Im Ergebnis erscheint das Konzept einer wiederaufladbaren Hochvalente-Ionen-Festkörperbatterie auf Aluminium-Basis als aussichtsreich (siehe Abbildung 1). Hierbei dient reines Aluminium als Anodenmaterial. Das bietet einerseits den Vorteil einer viermal höheren theoretischen Ladungsdichte im Vergleich zu Lithium. Bei gleichem Volumen der Aluminium-Ionen-Batterien würde ein Auto potenziell die doppelte 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



**Abbildung 2:** Rasterelektronenmikroskopie an einer Ti-Folie mit  $\text{TiO}_2$ -Nanoröhren, links: Draufsicht auf die  $\text{TiO}_2$ -Nanoröhren, rechts: Querschnitt durch die Oxidschicht der Ti-Folie.

Recyclinginfrastruktur, sodass Aluminium folglich kostengünstig ist. Es ist ein Kostensenkungspotenzial gegenüber kommerziellen Lithium-Systemen um ein Fünftel bezogen auf den Preis pro Kilowattstunde möglich. Darüber hinaus entzündet sich Aluminium nicht wie Lithium an Luft, wodurch eine höhere Sicherheit entsprechender Zellen und vereinfachte Verarbeitbarkeit gewährleistet werden kann. Damit könnten die Aluminium-Ionen-Batterien einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten.

Bisher war es nicht möglich, dieses technologische Potenzial zu nutzen, da geeignete Kathoden- und Elektrolytmaterialien fehlten. Das Auffinden von Materialien mit hoher Aluminiumionen-Mobilität – einsetzbar als Festelektrolyte oder Interkalationskathoden – wird einen Innovationssprung im Bereich der wiederaufladbaren Hochvalente-Ionen-Batterien ermöglichen. Hier setzt das BMBF-Verbundvorhaben „Maßgeschneiderte Materialsysteme und Technologien für die Rolle-zu-Rolle-Fertigung elektrochemischer Energiespeicher auf flexiblen Trägern – Hochvalente Ionen für die Energiewende (R2R-Battery)“ an.

## Foliendemonstrator zur Herstellung von $\text{TiO}_2$ -Nanoröhren

Die anodische Oxidation gilt als elektrolytisches Verfahren zur Herstellung von oxidischen Schichten auf Metallen. Industrielle Anwendung finden diese zum Beispiel bei der Herstellung von Schutzschichten gegen

Korrosion oder Abrieb, aber auch als Dielektrikum in Elektrolytkondensatoren. Dabei liegt ein wesentlicher Vorteil darin, dass der Effekt nur oberflächennah auftritt. Manche Metalle, wie zum Beispiel Titan, neigen dazu durch die feld-induzierte gerichtete Bewegung bestimmter Ionen, die im Elektrolyten vorhanden sind, nanostrukturierte Oxidschichten – sogenannte Titandioxid-Nanoröhren ( $\text{TiO}_2$ ) – zu bilden. Diese Art der Oberflächenbeschaffenheit eröffnet zudem die Möglichkeit die photovoltaischen, elektrochromen, katalytischen bzw. selbstreinigenden Eigenschaften für die Anwendung hinsichtlich biomedizinischer Beschichtungen oder Sensoren zu verbessern, da vor allem die spezifische Oberfläche maximiert und damit die Gesamteffizienz gesteigert werden kann. Zudem wird nanostrukturiertes  $\text{TiO}_2$  als Elektrodenmaterial für Lithium- und Aluminiumionenbatterien (AIB) diskutiert, wobei spezifische Kapazitäten zwischen 120 und 240 mAh/g erreicht werden.

Zur Anodisierung werden eine Ti-Folie (Dicke 50  $\mu\text{m}$ ) als Arbeitselektrode und eine Platin- oder Graphit-Gegenelektrode verwendet. Der eingesetzte Elektrolyt besteht aus Ethylenglykol (>99 %) unter Zugabe von 2 Vol.-% destilliertem Wasser und 0,3 Gew.-%  $\text{NH}_4\text{F}$ .

Zunächst bildet sich aufgrund der Wechselwirkung des Titans mit  $\text{H}_2\text{O}$  eine Oxidschicht. Zudem wird die anfänglich gebildete Oxidschicht mit Hilfe des elektrischen Feldes, unter gleichzeitiger Bildung von  $\text{Ti}^{4+}$ -Kationen, aufgelöst. Dabei kommt es zum Aufbrechen der Ti-O-Bindungen. Auf der Kathodenseite findet gleichzeitig die Spaltung von Wasser statt. Die bei der Wasserspaltung



**Abbildung 3:** Bandanlage zur anodischen Oxidation von Metallfolien. Die Anlage ist auf Folienmaße von 5 cm x 100 m ausgelegt.

erzeugten Sauerstoff-Anionen wandern von der Elektrolyt/Oxid-Grenzfläche über die zuvor gebildete Oxidschicht zur Metalloberfläche, während die  $Ti^{4+}$ -Ionen von der Metalloberfläche an der Metall/Oxid-Grenzfläche zur Oxid/Elektrolyt-Grenzfläche diffundieren. Die Wechselwirkung zwischen  $Ti^{4+}$  und  $O^{2-}$  und die Diffusion beider Ionen in die Oxidschicht werden durch das elektrische Feld unterstützt.

Die Anwesenheit der Fluoridionen im Elektrolyten stellt die Schlüsselrolle bei der Erzeugung einer selbstorganisierten röhrenförmigen Morphologie dar. Im Wesentlichen werden durch die Fluoridionen zwei Reaktionen erzwungen: Die erste ist eine Komplexbildungsreaktion, in der sie mit den an der Oxid/Elektrolyt-Grenzfläche

ausgestoßenen  $Ti^{4+}$ -Kationen zu  $[TiF_6]^{2-}$ -Spezies reagieren. Die zweite Reaktion ist ein chemischer Angriff auf die Oxidschicht. Fluoridionen lösen  $TiO_2$  chemisch auf, indem sie  $[TiF_6]^{2-}$  als eine wasserlösliche Spezies bilden, wodurch kleine „Gräben“ entstehen. Diese Gräben stellen die bevorzugten Stellen für die durch das elektrische Feld unterstützte chemische Auflösung dar. Mit der Zeit werden diese Gräben tiefer und das Material wird an diesen aktiven Stellen in amorphe Röhren (siehe Abbildung 2) umgewandelt. Anschließend werden die Folien im Ofen unter Luft getempert, um das amorphe  $TiO_2$  auszukristallisieren.

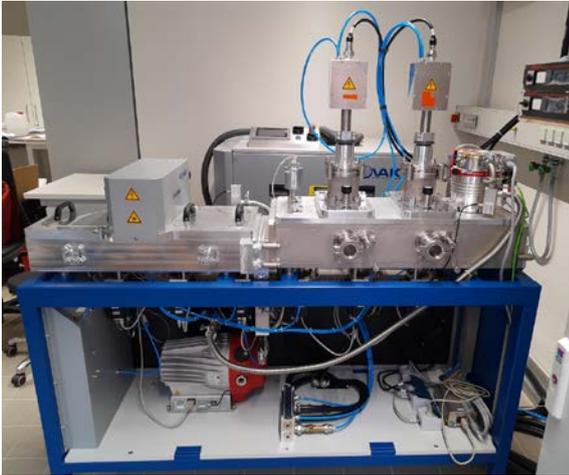
$TiO_2$  kristallisiert normalerweise in tetragonaler Symmetrie mit der Raumgruppe  $P4_2/mnm$  mit  $TiO_6$ -Oktaedern, die sich die Kanten entlang der  $c$ -Richtung teilen, während die Ecken entlang der  $ab$ -Ebenen liegen. In dieser Modifikation, die auch als Rutil bekannt ist, liegt eine leichte orthorhombische Verzerrung der  $TiO_6$ -Oktaeder vor. Auf Nanometerskala hingegen wird jedoch der Anteil der Oberflächenenergie in Bezug auf die Volumenphase so groß, dass diese modifikationsbestimmend wird und sich Anatas mit Raumgruppe  $I4_1/amd$  bildet.

Um im Projekt für die Fertigung von Batteriezellen auf große Mengen an Material für Elektroden zurückgreifen zu können, wurde der Bau einer Bandanlage zur anodischen Oxidation von Metallfolien initiiert. Als Modellprozess dient dabei natürlich die Herstellung von  $TiO_2$ -Nanoröhren, wobei auch andere Metallfolien im dafür notwendigen Elektrolyten oxidiert werden können.

Es musste darauf geachtet werden, dass die Komponenten, die mit Elektrolytlösung für den Oxidationsvorgang in Berührung kommen, chemisch stabil sind. Aus diesem Grund wurde auf PVDF als Material für das Elektrolytgefäß, die Rollen und entsprechende Halterungen zurückgegriffen, welches zudem auch für andere Elektrolytsysteme chemisch stabil ist. Die Abbildung 3 zeigt den fertigen Foliendemonstrator, der für Folien von bis zu 5 cm Breite ausgelegt ist. Die anodische Oxidation kann sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich erfolgen.

## Kombinierte Sputter-Blitz-Anlage

Finanziert als ZeHS-Großgerät konnte neben der nachfolgend beschriebenen R2R-Bandanlage eine weitere PVD-Anlage der Firma ROVAK installiert und in Betrieb



**Abbildung 4:** Die kombinierte Sputter-Blitz-Anlage besteht aus zwei Kammern: einer Blitzkammer (im Bild links) sowie einer Sputterkammer (im Bild rechts).

genommen werden. Sie erlaubt die unkomplizierte Beschichtung und Blitzlampenbehandlung von Probenstücken sowie Folien im Labormaßstab.

Die Anlage besteht aus einer Blitzkammer und einer Sputterkammer, die über ein Transferventil verbunden sind. Innerhalb der Kammern befindet sich eine Schiene, auf der ein Substratcarrier der Größe 180 mm × 200 mm linear gefahren wird. Der Carrier ermöglicht die Positionierung der Probe unter der Blitzlampe oder einem Sputtertarget (siehe Abbildung 4).

Zur Evakuierung der Kammern dienen eine Vorvakuumpumpe sowie eine Turbopumpe. Mithilfe der Turbopumpe wird ein Enddruck von unter  $5 \times 10^{-7}$  mbar erreicht. Beide Kammern sind durch ein Vakuumtransferventil getrennt und die Blitzkammer fungiert zusätzlich als Schleuse für den Probenwechsel. Auf diese Weise bleibt bei geschlossenem Ventil das Vakuum in der Sputterkammer erhalten. Ein Belüften der Sputterkammer ist nicht notwendig und weniger Verunreinigungen (Luft, Feuchtigkeit) gelangen in die Kammer. Für die Beschichtung wird Argon als Prozessgas genutzt und zum Belüften Stickstoff als Inertgas.

Für den DC-Sputterprozess sind zwei wassergekühlte Rundquellen zum Sputtern in der Anlage verbaut. Alternativ können für großflächige Beschichtungen planare Sputterquellen, identisch zur R2R-Anlage, eingebaut werden. In ersten Versuchen wurden Aluminium- und Titanschichten auf Silizium-Wafern abgeschieden.

Der Blitzlampenkopf ist an der Oberseite der Blitzkammer im Deckel integriert. Die Energieversorgung der Blitzlampe erfolgt über ein zusätzliches FLA-Steuermodul der Firma ROVAK (siehe Abbildung 4, im Hintergrund). Die Lampen sind für einen Dauerbetrieb von bis zu 5 min und für eine maximale Energiedichte von  $32 \text{ J/cm}^2$  ausgelegt.

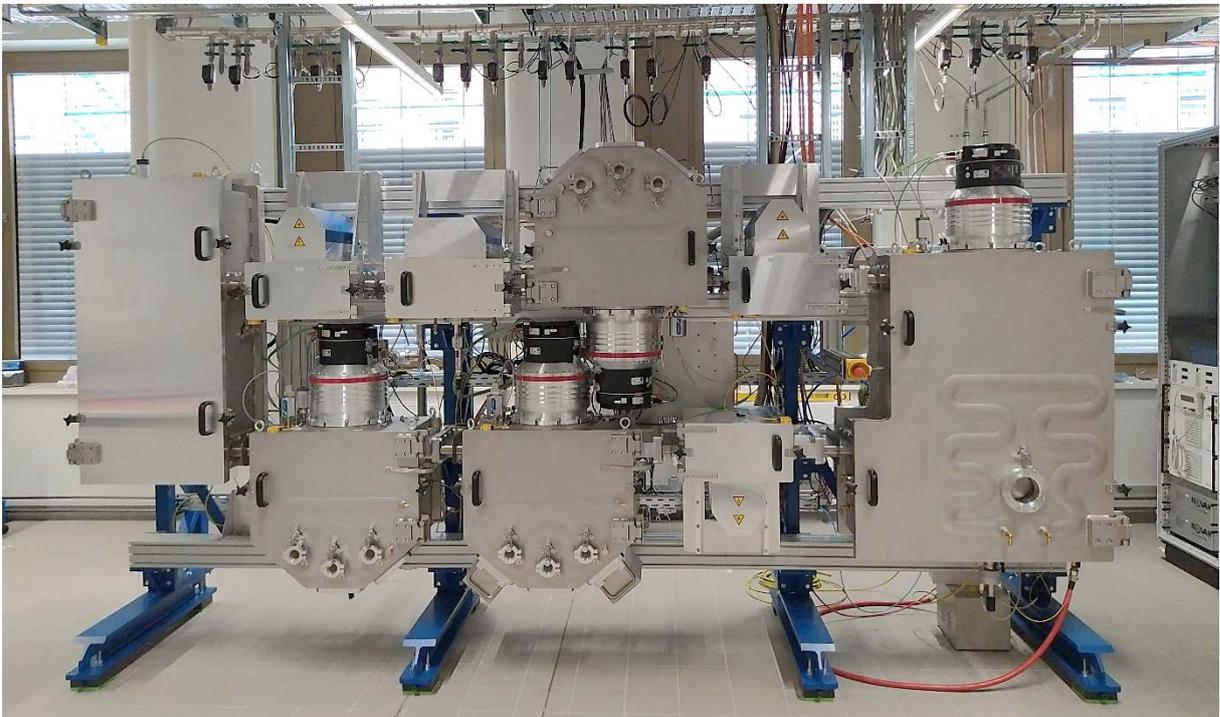
## R2R-Bandanlage

Aus Projektmitteln konnte eine R2R-Bandanlage zur Aufstellung am Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) von der Firma ROVAK beschafft werden. Die Anlage befindet sich momentan im Aufbau, in einem speziell dafür eingerichteten Labor des ZeHS (siehe Abbildung 5).

Mit ihrer Hilfe lassen sich verschiedene Folienmaterialien (z. B. Cu, Al) beschichten und anschließend direkt per Blitzlampenbehandlung (FLA) tempern. Die Folie befindet sich als gewickelte Rolle in der Anlage. Für die Beschichtung wird sie abgerollt, durch die verschiedenen Prozessabschnitte geführt und am Ende wieder aufgerollt. Die Anlage ist für Bänder mit einer Breite von 180 mm ausgelegt, bei einer Bandgeschwindigkeit von 0,01 m/min bis 3 m/min.

Sie verfügt über eine Oberflächenreinigung, verschiedene Beschichtungsmodule und mehrere Module zum Tempern der beschichteten Folie. Die Plasmareinigung der Oberfläche wird als erster Schritt durchgeführt. Dafür wird ein Argon-Plasma mit geringem Wasserstoffanteil verwendet. Die Ionen werden auf die Folienoberfläche beschleunigt, um die Bedeckungsschicht abzutragen. Verunreinigungen wie Oxide, Wasser oder organische Reste können so entfernt werden. Zur Beschichtung der Folie sind zwei Sputter-Module und ein Modul zum Elektronenstrahlverdampfen in der Anlage integriert. Beim Sputtern wird das Prinzip der Kathodenzerstäubung genutzt. Hierbei schlagen beschleunigte Argon-Ionen Material aus einem Target heraus. Die Atome bzw. Moleküle des Targets scheiden sich anschließend in Form einer Schicht auf dem Foliensubstrat ab.

In der R2R-Anlage sind zwei DC-Sputterkammern zur Abscheidung von leitfähigen Targetmaterialien (z. B. Si, Ti, Ni, Cu, Al) verbaut. Mit dem Elektronenstrahlverdampfer lassen sich verschiedene Feststoffe wie Silizium oder



**Abbildung 5:** Die am ZeHS im Aufbau befindliche R2R-Bandanlage der Firma Rovak wird die Beschichtung von Bändern auf bis zu 15 cm Breite und eine direkt anschließende Blitzlampenbehandlung ermöglichen.

Titan verdampfen und auf der Folie abscheiden. Dieser Prozess ermöglicht eine höhere Beschichtungsrate als das Sputtern.

Auf jede Beschichtungseinheit folgt ein FLA-Modul, mit dem die Beschichtung getempert werden kann. Die Lampen blitzen mit einer Frequenz von maximal 10 Hz. Für die Einzelblitze lassen sich verschiedene Parameter einstellen und Energiedichten von über  $40 \text{ J/cm}^2$  realisieren. Zusätzlich verfügt die Anlage über ein Heizmodul, mit dem die Folie konventionell getempert werden kann. Die Heizrate beträgt dabei  $300 \text{ K/min}$ .

Im Jahr 2021 wird die Beschichtungsanlage um ein Energiemanagement erweitert. Die Erweiterung dient zur Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs der stromintensiven Prozesse.

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



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

LEHRE



---

## DAS PHYSIKALISCHE GRUNDPRAKTIKUM UNTER PANDEMIEBEDINGUNGEN

Physikalische Laborpraktika sind ein wesentlicher Bestandteil des Grundstudiums sowohl naturwissenschaftlicher als auch ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge. Auch an der TU Bergakademie Freiberg sind sie verpflichtend für alle Studierenden dieser Studiennrichtungen. Das Institut für Experimentelle Physik organisiert das Physikalische Grundpraktikum jedes Semester für mehr als 100 Studierende.

Bis zum Wintersemester 2019/20 folgte auf die selbstständigen Vorarbeiten zu Hause ein Antestat vor Ort im Institut, bei dem die Studierenden eine ausreichende Vorbereitung auf das anstehende Experiment nachweisen mussten. Darauf folgte der wesentlichste Teil eines physikalischen Praktikums: Das selbstständige oder gruppenweise experimentelle Arbeiten. Zum Abschluss eines Versuchs mussten Protokolle angefertigt werden, welche idealerweise noch vor Ort testiert wurden.

In Folge der fortschreitenden Pandemie war dieser Ablauf im Sommersemester nicht mehr aufrecht zu erhalten. Während die theoretische Auseinandersetzung mit den zu vermittelnden Inhalten weiterhin problemlos möglich ist, war das eigentliche Ziel des Praktikums, die

Durchführung und Auswertung von physikalischen Messungen, nicht durchführbar. Zusätzlich erschwert wurde die Situation dadurch, dass nur sehr wenig Zeit für die Umstellung auf ein Online-Semester zur Verfügung stand. Dadurch war es leider nicht möglich, aufwendige Lehrvideos der einzelnen Experimente zu erstellen, welche eine Präsenz vor Ort zumindest teilweise ersetzen könnten. Auf Grund der Unsicherheit über Dauer und Entwicklung der Pandemie kam auch eine zeitliche Verschiebung nicht in Frage, da dies eine Konzentration des Arbeitsaufwandes sowohl für Studierende und Lehrkräfte zur Folge gehabt hätte, die nicht zu bewältigen gewesen wäre.

Um vor diesem Hintergrund dennoch den Abschluss des Praktikums zu ermöglichen, wurden den Studierenden simulierte Daten für die Experimente zur Verfügung gestellt. Dazu haben die Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Physik in enger Zusammenarbeit und durch einen großen Kraftakt Programme geschrieben, welche realistische und individualisierte Datensätze erzeugen. Zusätzlich mussten die Versuchsanleitungen und -beschreibungen abgeändert werden, damit eine



selbstständige Bearbeitung zu Hause möglich ist. Weiterhin wurden Video-Tutorials zu den Themen erstellt, mit denen die Studierenden erfahrungsgemäß die meisten Schwierigkeiten haben und welche üblicherweise vor Ort ausführlich erklärt wurden.

Auf diese Weise konnte den Studierenden trotz der besonderen Umstände ein regulärer Studienfortschritt ermöglicht werden. Dennoch können in einem solchen reinen Online-Format nicht alle Lernziele des physikalischen Praktikums erreicht werden. Während die theoretische Auseinandersetzung mit den zu vermittelnden Lerninhalten teilweise sogar ausgebaut werden konnte, blieben die Erfahrungen des experimentellen Arbeitens wie die Aufnahme eigener Messwerte und die Sensibilisierung für auftretende Fehlerquellen auf der Strecke. Ein Vorteil solcher Online-Experimente ist jedoch, dass sich die Studierenden stärker mit dem Computer-basierten Umgang mit Messdaten vertraut machen und auch

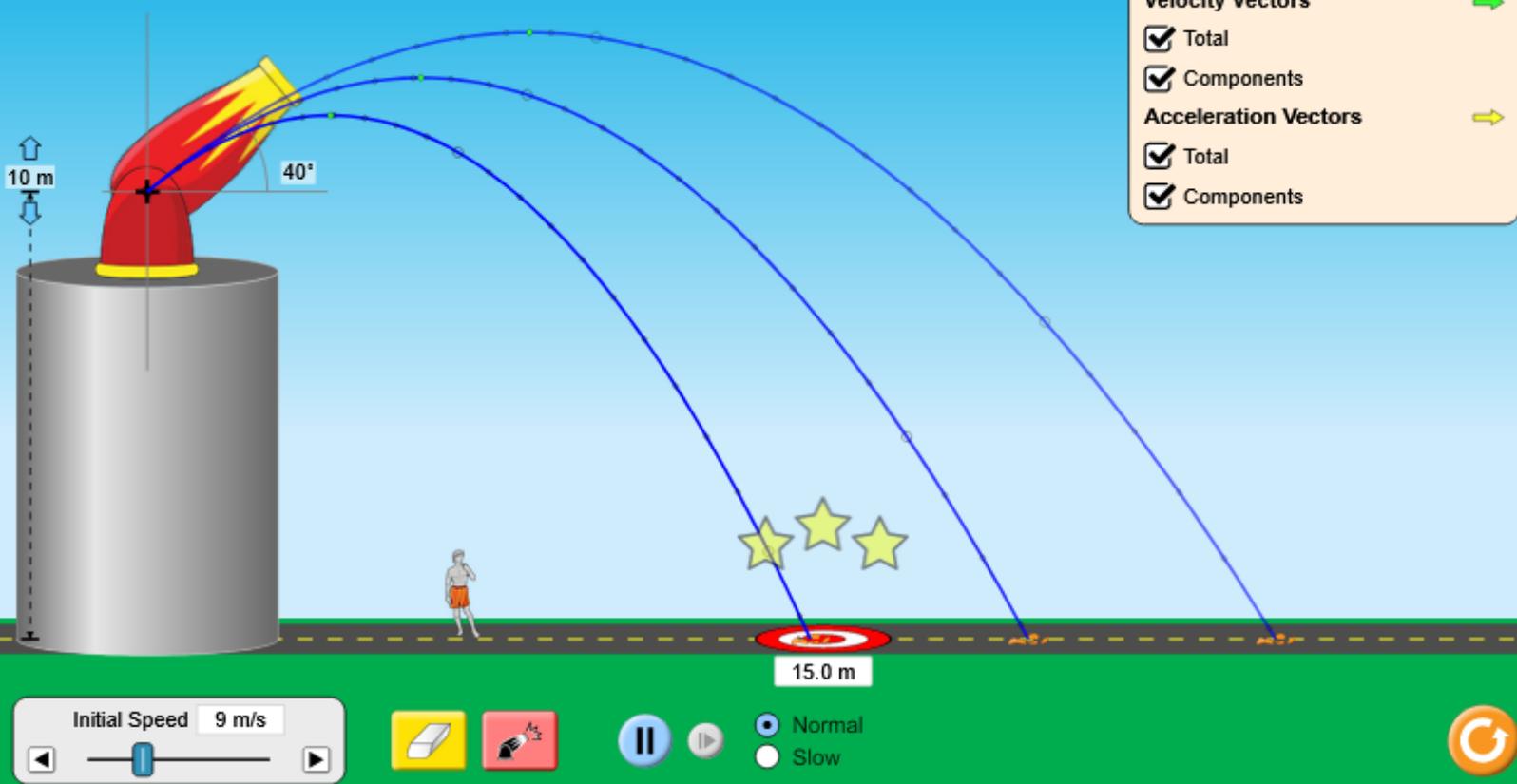
eine ordnungsgemäße digitale Protokoll-Abgabe erlernen können.

Ergänzend wurde ein Fadenpendel@home-Experiment entwickelt, bei dem die Studierenden mit Hilfe eines selbst gebastelten Fadenpendels (siehe Abbildung) ihre eigenen Messwerte aufnehmen können. Neben einer klassischen Stoppuhr kommt dabei auch eine Smartphone-App zum Einsatz, was den Umgang mit moderner Technik stärkt.

Das Wintersemester 2020/21 konnte auf Grund niedriger Inzidenz-Werte als Präsenzpraktikum begonnen werden. Voraussetzung dafür war ein Hygienekonzept, dessen wesentliche Merkmale eine begrenzte Raumkapazität, Maskenpflicht, intensives Lüften sowie der Einsatz von Hand- und Flächendesinfektionsmittel waren. Einzuhalten Abstände zwischen den Studierenden stellten jedoch ganz neue Herausforderungen an die Praktikumsbetreuenden, da nun statt der üblichen zwei bis zu vier verschiedene Experimente gleichzeitig beaufsichtigt werden mussten, wenn auch mit jeweils deutlich weniger Studierenden pro Experiment. Ebenso nahm die Anzahl der Termine für die Mitarbeiter zu.

Vorteilhaft war allerdings, dass man deutlich den Lernfortschritt in Folge des experimentellen Arbeitens spüren konnte. Das Besprechen auftretender Verständnisprobleme ist im direkten Gespräch auch wesentlich effizienter als durch E-Mail-Verkehr. Dadurch und auf Grund der Vorarbeiten aus dem vorangegangenen reinen Online-Semester war der Übergang zum digitalen Lernformat nach dem 1. Dezember 2020 in Folge der steigenden Inzidenzen gut zu bewerkstelligen. Anleitungen und Datensätze lagen bereits vor und die Studierenden kamen wesentlich besser mit der Datenauswertung und der Protokollanfertigung zu Recht, als es im Sommersemester 2020 der Fall war.

Langfristig werden Lehrende und Lernende von diesen Erfahrungen profitieren. So stehen den Studierenden zum Beispiel die erstellten Video-Tutorials auch zukünftig zur Verfügung und es wurden zahlreiche weitere Ideen entwickelt, deren Umsetzung auf Grund des großen Aufwandes nicht in so kurzer Zeit möglich war. Dazu gehört auch die Möglichkeit, Antestate online durchführen zu können. Das wird einerseits Zeit vor Ort sparen und gleichzeitig durch die Möglichkeit zur Selbsttestung den Lernfortschritt insgesamt erhöhen sowie für einzelne Studierende eine individuelle Anpassung ermöglichen.



## DIE DIGITALISIERUNG DER ÜBUNGEN UND PRÜFUNGEN

Das Coronajahr bescherte der Lehre neue Spielregeln. Die Interaktion mit den Studenten in Übungskursen fiel aus. Es war nicht möglich, im Klassenzimmer herumzulaufen und den Studenten über die Schulter zu schauen, um ihre Berechnungen auf dem Papier zu überprüfen und ihnen Hinweise zu geben. Die Studenten bekamen nur noch eingeschränkt die Möglichkeit, Fragen aus erster Hand zu stellen und sich von einem Experten ihre Blockaden lösen zu lassen. Das Virus kam und beendete die Ära der zwischenmenschlichen Interaktion – aber nur im ersten Schockmoment. In diesem Artikel beschreiben wir, wie die Erstsemesterkurse Physik für Naturwissenschaftler I und II digitalisiert wurden und wie man eine digitale Prüfung plant.

### Digitaler Übungskurs

Das Sommersemester 2020 begann mit Unterricht auf der virtuellen Plattform *BigBlueButton* (BBB), ähnlich wie *Zoom*. Für kooperative Diskussionen und Interaktivität arbeiteten wir mit *Etherpad/Topad* und *Padlet/Concept*

*board*, die es den Studenten ermöglichen, Gedanken als Text bzw. Grafik zeitgleich und für alle sichtbar zu sammeln (siehe Abbildung 1). Einige spezifische Diskussionen wurden in *Breakout*-Räumen auf BBB durchgeführt.

Unser erster Gedanke war, dass es eine Verschwendung wäre, den Studenten während des virtuellen Unterrichts Zeit für Berechnungen zu geben, da wir nicht überprüfen können, was sie tun. Es wäre viel fruchtbarer, wenn wir den Ansatz einen Schritt weg vom Üben hin zum Beraten ändern würden. Wir beschlossen, die synchronen Sitzungen als Konsultationen zu bezeichnen, an denen die Studenten mit einer grundlegenden Vorbereitung, die im Vorfeld stattfinden soll, und einer Handvoll Fragen, die sie besprechen sollten, teilnehmen würden. Auf diese Weise verwandelten wir den Kurs in eine Art *Flipped Classroom*. Damit es funktionierte, war es notwendig, die Lösungen zu allen Übungsaufgaben im Voraus bereitzustellen. Dennoch wurde den Studenten die Möglichkeit geboten, die Lösung zu einer Aufgabe im Semester einzureichen und ein detailliertes Feedback zu ihrem gewählten physikalischen Ansatz und der Klarheit der Lösung zu erhalten.

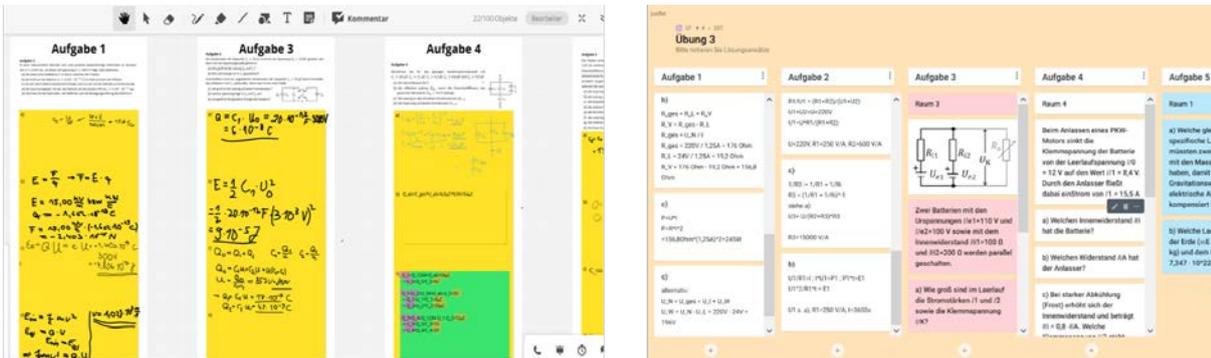


Abbildung 1: Online-Austauschwerkzeuge Concept Board und Padlet

Für die Vorbereitung der Studenten zu Hause wurde asynchrones Material bereitgestellt. Bereits im Jahr 2017 wurde ein Onlinekurs erstellt, um den Erstsemestern eine Hilfestellung bei neu eingeführten Themen zu geben. Er war über die Jahre nur mäßig genutzt worden, obwohl zu Beginn jeder Übung ein Antestat eingeführt worden war, an Hand dessen Zusatzpunkte für die Prüfung gesammelt werden konnten. Wegen Corona wurde entschieden, die Zusatzpunkte direkt online zu vergeben. Wir wussten, dass darin ein gewisses Schummelpotenzial lag, aber Corona erforderte schnelle und praktikable Maßnahmen und wir konnten tatsächlich einen Anstieg der Online-Aktivitäten beobachten. Der Onlinekurs wurde studentenfreundlicher gestaltet – Feedback für jede falsche Antwort wurde implementiert, nichtlineare Lösen der Aufgaben sowie direkte Wiederholungen waren ohne Strafe erlaubt. Auf diese Weise wurden die Studenten ermutigt, die Tests so oft zu wiederholen, bis sie eine perfekte Punktzahl erreichten. Nur die höchste erreichte Punktzahl wurde bei der Modulprüfung berücksichtigt. Die Studenten sollten auch mit den wichtigsten Formeln vor dem Unterricht vertraut gemacht werden. Daher erstellten wir kleine Formel- und Einheitsenspiele, um neue physikalische Größen einzuführen. Wir verwendeten OPAL als Kursplattform und ONYX zur Programmierung der Aufgaben und Spiele.

Wir begannen damit, uns selbst bei der Lösung ausgewählter physikalischer Beispielaufgaben aufzuzeichnen, um daraus Tutorials zu erstellen. Mehrere Kollegen halfen bei dieser Aufgabe, was die persönliche Arbeitsbelastung senkte und für die Studenten besser war, da sie verschiedene Lehrstile erleben konnten. Für Fragen, die während

des Selbststudiums auftauchten, wurde ein Forum als einziger Kommunikationskanal eingerichtet. Das heißt, alle Fragen – auch solche, die als private E-Mails versandt wurden – wurden in anonymisierter Form (siehe <https://www.patternpool.de/pattern/forenarbeit-effektiv-initiieren>) im Forum beantwortet, sofern sie für mehr als einen relevant waren. Im darauffolgenden Semester wurden alle Fragen im Forum strukturiert und in einem Wiki zusammengestellt, damit sie nach Themen durchstöbert werden können. Es wurden auch ein paar ausgefallene Aktivitäten eingeführt. Mit der Software H5P wurden interaktive Materialien erstellt (siehe das Beispiel unserer Zeitleiste für die Planung einer digitalen Prüfung unter <https://blogs.hrz.tu-freiberg.de/elearning/best-practice-individuelle-klausuren-fuer-teilnehmerstarke-pruefungen>), um die Studenten zu ermutigen, z. B. die auf ein Objekt wirkenden Kräfte selbst zu entdecken und zuzuweisen. Und es wurde ein Wettbewerb eingeführt, um die Studenten gegeneinander antreten zu lassen. Sie sollten ein mit einem Mobiltelefon aufgenommenes Video von einem sehr ausgefallenen, energiegeladenen Skaterpark einsenden, den sie auf dieser Seite erstellt hatten (siehe <https://phet.colorado.edu/de/simulation/energy-skate-park-basics>).

Die Erstellung dieses digitalen Kurskonzepts ging mit einem erheblichen Zeitbudget einher. Aber das Konzept wurde nicht innerhalb eines Semesters aus dem Nichts geschaffen, sondern es ist Stück für Stück unter der Mitarbeit von zwei bis sechs lehrmotivierten Kollegen über vier Jahre lang gewachsen. Am Ende staunten wir selbst, wie viele Materialien das gesamte Team erstellt hatte. Das bleibt nicht unbemerkt: Wir werden immer wieder gebeten, über unsere Erfahrungen zu berichten. Bei einer

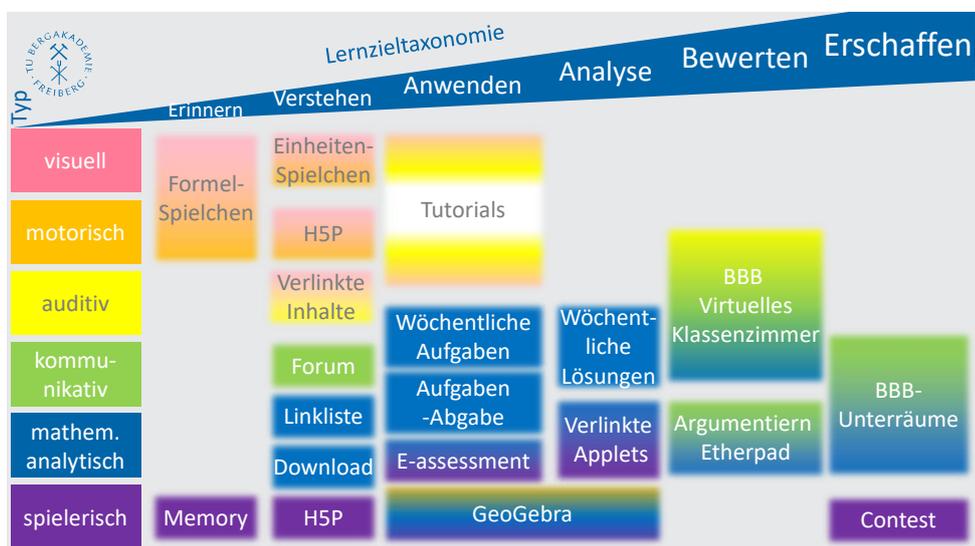


Abbildung 2: Zusammenfassung und Klassifizierung unserer Online-Lernmaterialien

dieser Gelegenheiten haben wir die erstellten Aktivitäten zusammengefasst und nach Lerntyp und Taxonomie klassifiziert (siehe Abbildung 2).

## Digitale Prüfung

Der Jahreswechsel kam und es begann sich abzuzeichnen, dass die Pandemiesituation es nicht erlauben würde, mit der Lösung aus dem Sommer 2020 davonzukommen: Digitaler Unterricht und dennoch Präsenzprüfung. Wir wollten weder die Prüfung um ein Semester verschieben, noch über 150 mündliche Prüfungen durchführen.

Wir haben uns für das *Paper-Pencil*-Fernklausurmodell entschieden, bei dem die Prüfung zu Hause auf Papier geschrieben wird und die geschriebenen Blätter abfotografiert und an den Prüfer zurückgeschickt werden. Die vollständigen Lösungswege für jede Übung sind uns wichtig; sehr oft machen Studenten einen Fehler im Lösungsweg und geben eine falsche Antwort an. Hätten wir ein reines Digitalprüfungsmodell wie bei unserem Onlinekurs verwendet, wären zu viele Punkte durch kleine Fehler im Hintergrund verloren gegangen. Alternativ hätte der Umgang mit einem Mathe-Skript gelehrt werden müssen, damit die Studenten Formeln für Zwischenschritte eingeben können, aber das wäre für Erstsemester vielleicht zu viel verlangt.

Im Zeitalter von *Instant Messaging* war es wichtig, den regen Austausch von Lösungen unter dem Tisch zu erschweren. Dies wurde erreicht, indem wir 160 verschiedene, aber gleichwertige Prüfungsdokumente erstellten. Mit ONYX wurden die vorgegebenen Größen mit Variablen versehen: Der beliebte Physikhund, der in vielen unserer Aufgaben auftaucht, wog etwas im Bereich zwischen 10,0 kg und 19,0 kg. Dieser Hund, der eigentlich Blacky heißt, erhielt für verschiedene Benutzer verschiedene Namen, was zu gewisser Verwirrung führen sollte, wenn man nach dem Ergebnis der Aufgabe mit Felix fragte. („Meinst du die mit Wufwuf?“) Außerdem wurde die Aufgabenreihenfolge variiert. ONYX kann so programmiert werden, dass es für jede Prüfungsdokumentversion ein Masterdokument generiert, so dass wir an der Kontrolle nicht verzweifeln müssen. Die 160 (plus Puffer) so generierten Prüfungsversionen wurden als PDF exportiert und auf die Plattform OPALexam hochgeladen, die im Wintersemester 20/21 eigens für digitale Prüfungen geschaffen wurde. Auf dieser Plattform können die Studenten zum festgelegten Zeitpunkt ein zufälliges Prüfungsdokument ziehen und ihre Arbeitsblätter hochladen, wenn die Prüfungszeit vorbei ist.



Die digitale Überwachung stellt die zweite Säule gegen Täuschung dar. Die Prüflinge mussten die Prüfung

vor einer laufenden Kamera ablegen, die während der gesamten Prüfungsdauer von 120 min plus 30 min vorher für die Ausweiskontrolle/Organisation und 20 min nachher für die Abgabe der Arbeit ihre Gesichter, Hände und Blätter filmte. Auch wenn jemand vor Ablauf der Zeit fertig war, durfte niemand den Aufsichtssraum vorzeitig verlassen. Während der Prüfung war die Benutzung von Tastaturen verboten – die gesamte Navigation sollte mit der Maus erfolgen. Die Prüflinge wurden entsprechend ihres Studiengangs in kleinere Gruppen von maximal 20 Teilnehmern eingeteilt. Insgesamt waren acht Räume nötig, die von 16 Mitarbeitern beaufsichtigt wurden. Es sollten nicht weniger als zwei Aufseher pro Raum sein, denn sobald es ein Problem gibt, fällt einer zu dessen Behebung aus, und die Aufsicht führt der verbleibende Mitarbeiter fort.

Eine gute Internetanbindung ist für die Durchführung einer digitalen Prüfung unerlässlich. Für den Fall, dass jemand die Verbindung verliert, wurden Telefonnummern der Aufsicht zur Verfügung gestellt, damit die Studenten anrufen und verbunden bleiben, bis das Internet wieder da ist. Da aber in den allermeisten Fällen der Verbindungsverlust von den Studenten unbemerkt bleibt, ist das Mitteilen der Telefonnummern der Studenten günstiger. Es muss nur sichergestellt werden, dass nur ein Weckruf ankommt, aber keine sonstigen Störsignale.

Die digitale Prüfungsdurchführung erfordert viel Planungszeit. Es muss sichergestellt werden, dass sowohl die Studierenden als auch die Aufsichtspersonen alle gelernt haben, wie man die Plattformen nutzt, die Überwachungsräume konfiguriert und betritt, die erlaubten Hilfsmittel findet und über verbotene Gegenstände und Aktivitäten informiert ist. Es ist wichtig, Handouts und FAQs vorzubereiten sowie Fragen im Forum zu beantworten. Im besten Fall wird eine Probeklausur organisiert, so dass beide Seiten ihre Rollen einmal gespielt haben, bevor der große Tag kommt.

Aufgrund von Corona und vermutlich wegen der Etablierung des *Flipped Classroom*, der mehr Disziplin erfordert, kam im Laufe des Semesters bis zu einer Hälfte der Studentenzahl aus unseren synchronen Sitzungen abhanden. Zu unserer Überraschung erschienen die Studenten, die wir aus den Augen verloren hatten, wieder zur Prüfung und die Erfolgsquote war niedriger, aber vergleichbar mit regulären Semestern.

## Zusammenfassung

Eine Pandemie ist ein Digitalisierungsbeschleuniger und Kreativitätsbooster. Schummelfreie digitale Prüfungen für große Teilnehmergruppen sind möglich, erfordern aber mehr Organisation und Personenstunden.



---

## PHYSIKAUFRISCHUNG VOR STUDIENBEGINN

Ein Studienstart in Pandemiezeiten ist hoffentlich ein Ausnahmeereignis. Mit unserem Auffrischkurs Physik waren wir daran beteiligt, trotzdem einen guten Studieneinstieg zu gestalten. Neben den Vorkursen Mathematik und Chemie ist der Vorkurs Physik Bestandteil der Einführungstage an der TU Bergakademie Freiberg. Der Vorkurs Physik entstand im Oktober 2017 im Rahmen des durch den Europäischen Sozialfonds geförderten Projektes „Ausgleich unterschiedlicher fachlicher und nichtfachlicher Qualifikationen in der Studieneingangsphase“ (Antragsnummer 100298803).

Im Jahr 2020 nahmen etwa 150 Erstsemester-Studierende aus natur- sowie ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen teil. Inhaltlich und didaktisch konnte Dr. Mateo de Vivanco auf den Vorjahresvorkursen aufbauen.

Damit Abstands- und Hygieneregeln eingehalten werden konnten, wurden die Studienanfänger fakultätsweise auf die drei größten Hörsäle der Bergakademie aufgeteilt. Die Live-Veranstaltung wurde während der Input-Phasen von Dr. de Vivanco in die anderen beiden Hörsäle und in YouTube gestreamt. In allen Hörsälen waren weitere Betreuer vorhanden, die die Studienanfänger in den Übungsphasen inhaltlich unterstützen konnten. Quizzes mit allen Studierenden in allen Hörsälen wurden über ein entsprechendes *Audience-Response-System* durchgeführt.

So wurde es den Erstsemestern aller natur- sowie ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge auch in einer Pandemiesituation ermöglicht, die Auffrischung ihres Physik-Wissens mit dem persönlichen Kennenlernen ihrer Kommilitonen zu kombinieren.



---

## ANGEBOTENE LEHRMODULE

**Fundamentals of Crystallography**, Modulverantwortlicher: Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk,  
beteiligte Vorlesende: Dr. Hartmut Stöcker, Dr. Volodymyr Levitskyi, Übung: Dr. Hartmut Stöcker,  
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 1 SWS Übung

**Grundlagen der Halbleiterbauelemente**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer  
beteiligte Vorlesende: Dr. Barbara Abendroth  
Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Praktikum

**Halbleiterphysik**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Dr. Matthias Zschornak, Übung: Dr. Günter Gärtner  
Wintersemester, 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung

**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

**Physik für Ingenieure**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Johannes Heitmann,  
Praktikumsplanung durch Manuel Feig,  
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: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Dr. Matthias Zschornak,  
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung

**Physik für Naturwissenschaftler II**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Dr. Matthias Zschornak,  
Sommersemester, 2 SWS Vorlesung, 4 SWS Praktikum, 1 SWS Übung

**Semiconductors**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Dr. Friedrich Roth, 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

**Spectroscopy**, Modulverantwortliche: Prof. Dr. Martin Knupfer, Dr. Friedrich Roth,  
beteiligte Vorlesende: Prof. Dr. Martin Knupfer, Dr. Friedrich Roth  
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, ½ SWS Exkursion

**Struktur der Materie I: Festkörper**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk,  
Wintersemester, 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung

**Struktur der Materie II: Elektronische Eigenschaften**, Modulverantwortlicher: Prof. Dr. Dirk C. Meyer,  
beteiligte Vorlesende: Jun.-Prof. Dr. Roman Gumeniuk,  
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

- A. Mohammad, H. Stöcker, E. Mehner, J. Hanzig, D. C. Meyer: **Field-induced piezoelectricity in SrTiO<sub>3</sub> at room temperature determined by interferometric measurement**, *Journal of Applied Physics* 128 (2020) 214101
- T. Leisegang, A. A. Levin, A. Kupsch: **From Ritter's pile to the aluminium-ion battery – Peter Paufler's academic genealogy**, *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials* 235 (2020) 481–511
- M. U. de Vivanco, M. Zschornak, H. Stöcker, S. Jachalke, E. Mehner, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Pyroelectrically-driven chemical reactions described by a novel thermodynamic cycle**, *Physical Chemistry Chemical Physics* 22 (2020) 17781
- I. Gamov, E. Richter, M. Weyers, G. Gärtner, K. Irmscher: **Carbon doping of GaN: Proof of the formation of electrically active tri-carbon defects**, *Journal of Applied Physics* 127 (2020) 205701
- S. K. Sharma, T. Behm, T. Köhler, J. Beyer, R. Gloaguen, J. Heitmann: **Library of UV-Visible Absorption Spectra of Rare Earth Orthophosphates, LnPO<sub>4</sub> (Ln = La–Lu, except Pm)**, *Crystals* 10 (2020) 593
- S. Kaiser, S. Wagner, C. Moschner, C. Funke, O. Wiche: **Accumulation of germanium (Ge) in plant tissues of grasses is not solely driven by its incorporation in phytoliths**, *Biogeochemistry* 148 (2020) 49–68
- T. Weigel, C. Funke, M. Zschornak, T. Behm, H. Stöcker, T. Leisegang, D. C. Meyer: **X-ray diffraction using focused-ion-beam-prepared single crystals**, *Journal of Applied Crystallography* 53 (2020) 614–622

- M. Nentwich, M. Zschornak, M. Sonntag, R. Gumeniuk, S. Gemming, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Structure variations within  $RSi_2$  and  $R_2TSi_3$  silicides. Part II. Structure driving factors**, Acta Crystallographica B 76 (2020) 378–410
- M. Nentwich, M. Zschornak, M. Sonntag, R. Gumeniuk, S. Gemming, T. Leisegang, D. C. Meyer: **Structure variations within  $RSi_2$  and  $R_2TSi_3$  silicides. Part I. Structure overview**, Acta Crystallographica B 76 (2020) 177–200
- E. Ovchinnikova, D. Novikov, M. Zschornak, A. Kulikov, K. Kozlovskaya, V. Dmitrienko, A. Oreshko, A. Blagov, E. Mukhamedzhanov, N. Marchenkov, M. Borisov, A. Khadiev, A. Petrenko, Y. Pisarevsky: **Forbidden Reflections in  $TeO_2$  in the Vicinity of the Te  $L_1$  Absorption Edge**, Crystals 10 (2020) 719
- P. D. Lomenzo, S. Jachalke, H. Stöcker, E. Mehner, C. Richter, T. Mikolajick, U. Schröder: **Universal Curie constant and pyroelectricity in doped ferroelectric  $HfO_2$  thin films**, Nano Energy 74 (2020) 104733
- R. Wonneberger, S. Lippmann, B. Abendroth, A. Carlsson, M. Seyring, M. Rettenmayr, A. Undisz: **Bridging the gap between high temperature and low temperature oxidation of 316L**, Corrosion Science 175 (2020) 108884
- V. R. Rayapati, D. Bürger, N. Du, C. Kowol, D. Blaschke, H. Stöcker, P. Matthes, R. Patra, I. Skorupa, S. E. Schulz, H. Schmidt: **Charged domains in ferroelectric, polycrystalline yttrium manganite thin films resolved with scanning electron microscopy**, Nanotechnology 31 (2020) 31LT01
- V. Begeza, E. Mehner, H. Stöcker, Y. Xie, A. García, R. Hübner, D. Erb, S. Zhou, L. Rebohle: **Formation of Thin NiGe Films by Magnetron Sputtering and Flash Lamp Annealing**, Nanomaterials 10 (2020) 648
- M. J. Momeni, M. Mousavi-Khoshdel, T. Leisegang: **Exploring the performance of pristine and defective silicene and silicene-like  $XSi_3$  ( $X = Al, B, C, N, P$ ) sheets as supercapacitor electrodes: A density functional theory calculation of quantum capacitance**, Physica E (2020) 114290
- P. Solokha, R. A. Eremin, T. Leisegang, D. M. Proserpio, T. Akhmetshina, A. Gurskaya, A. Saccone, S. De Negri: **A new quasicrystal approximant in the Sc–Pd system: from topological data mining to the bench**, Chemistry of Materials 32 (2020) 1064–1079

## Kristallphysik

- M. Feig, M. Baenitz, M. Bobnar, K. Lüders, M. Naumann, W. Schnelle, S. Medvediev, K. M. Ranjith, E. Hassinger, T. Weigel, D. C. Meyer, A. Leithe-Jasper, J. Kortus, R. Gumeniuk: **Anisotropic superconductivity and quantum oscillations in the layered dichalcogenide  $TaSnS_2$** , Physical Review B 102 (2020) 214501
- O. Sichevych, S. Flipo, A. Ormeci, M. Bobnar, L. Akselrud, Y. Prots, U. Burkhardt, R. Gumeniuk, A. Leithe-Jasper, Y. Grin: **Crystal Structure and Physical Properties of the Cage Compound  $Hf_2B_{2-2\delta}Ir_{5+\delta}$** , Inorganic chemistry 59 (2020) 14280–14289
- V. Levytskyi, P. Wyzga, O. Isnard, V. Babizhetskyy, B. Kotur: **Heat capacity and high temperature electrical transport properties of  $TbNiC_2$** , Solid State Sciences 108 (2020) 106396

- J. Knaus, M. Sommer, P. Duchstein, R. Gumeniuk, L. Akselrud, S. Sturm, G. Auffermann, C. Hennig, D. Zahn, J. Hulliger, E. V. Sturm: **Polar Structure Formation in Solid Solution of Strontium-Substituted Fluorapatite–Gelatin Composites: From Structural and Morphogenetic Aspects to Pyroelectric Properties**, Chemistry of Materials 32 (2020) 8619–8632
- M. Feig, W. Schnelle, A. Maisuradze, A. Amon, C. Baines, M. Nicklas, S. Seiro, L. Howald, R. Khasanov, A. Leithe-Jasper, R. Gumeniuk: **Conventional isotropic s-wave superconductivity with strong electron-phonon coupling in  $\text{Sc}_5\text{Rh}_6\text{Sn}_{18}$** , Physical Review B 102 (2020) 024508
- P. Wyzga, W. Carrillo-Cabrera, L. Akselrud, I. Veremchuk, J. Wagler, C. Hennig, A. A. Tsirlin, A. Leithe-Jasper, E. Kroke, R. Gumeniuk: **Crystal structure, phase transition and properties of indium (iii) sulfide**, Dalton Transactions 49 (2020) 15903–15913
- P. Wyzga, I. Veremchuk, M. Bobnar, P. Koželj, S. Klenner, R. Pöttgen, A. Leithe-Jasper, R. Gumeniuk: **Structural Peculiarities and Thermoelectric Study of Iron Indium Thiospinel**, Chemistry – A European Journal 26 (2020) 5245–5256
- M. Feig, L. Akselrud, W. Schnelle, V. Dyadkin, D. Crernyshov, A. Ormeci, P. Simon, A. Leithe-Jasper, R. Gumeniuk: **Crystal structure, chemical bonding, and electrical and thermal transport in  $\text{Sc}_5\text{Rh}_6\text{Sn}_{18}$** , Dalton Transactions 49 (2020) 6832–6841
- V. Babizhetskyy, V. Levytskyi, R. Jardin, J. Bauer, R. Guérin, R. Gautier, B. Fontaine, J.-F. Halet: **Rare-earth metal borosilicides  $R_2\text{Si}_{15-x}\text{B}_3$  ( $R = \text{Tb}, \text{Yb}$ ): New ordered structures derived from the  $\text{AlB}_2$  structure type**, Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 646 (2020) 1168–1175
- P. Wyzga, I. Veremchuk, M. Bobnar, C. Hennig, A. Leithe-Jasper, R. Gumeniuk: **Ternary  $M\text{In}_2\text{S}_4$  ( $M = \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}$ ) thiospinels – crystal structure and thermoelectric properties**, Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 646 (2020) 1091–1098

## Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

- S. Pascarelli, S. Molodtsov, T. Tschentscher: **Creating a diverse international user facility**, Nature Reviews Physics 2 (2020) 337–339
- M. Borgwardt, J. Mahl, F. Roth, L. Wenthaus, F. Brauße, M. Blum, K. Schwarzburg, G. Liu, F. M. Toma, O. Gessner: **Photoinduced Charge Carrier Dynamics and Electron Injection Efficiencies in Au Nanoparticle-Sensitized  $\text{TiO}_2$  Determined With Picosecond Time-Resolved X-Ray Photoelectron Spectroscopy**, Journal of Physical Chemistry Letters 11 (2020) 5476–5481
- F. Roth, A. Revcolevschi, B. Büchner, M. Knupfer, J. Fink: **Evidence for an orbital dependent Mott transition in the ladders of  $(\text{La}, \text{Ca})_x\text{Sr}_{14-x}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$  derived by electron energy loss spectroscopy**, Physical Review B 101 (2020) 19513
- O. V. Molodtsova, I. M. Aristova, D. V. Potorochin, S. V. Babenkov, I. I. Khodos, S. L. Molodtsov, M. Vorokhta, V. Yu. Aristov: **Noble metal nanoparticles in organic matrix**, Applied Surface Science 506 (2020) 144980

- O. V. Molodtsova, I. M. Aristova, D. V. Potorochin, S. V. Babenkov, I. I. Khodos, S. L. Molodtsov, A. A. Makarova, D. A. Smirnov, V. Yu. Aristov: **2D/3D Metallic Nano-objects Self-Organized in an Organic Molecular Thin Film**, ACS Omega 5 (2020) 10441–10450
- M. K. Rabchinskii, S. A. Ryzhkov, D. A. Kirilenko, N. V. Ulin, M. V. Baidakova, V. V. Shnitov, S. I. Pavlov, R. G. Chumakov, D. Yu. Stolyarova, N. A. Besedina, A. V. Shvidchenko, D. V. Potorochin, F. Roth, D. A. Smirnov, M. V. Gudkov, M. Brzhezinskaya, O. I. Lebedev, V. P. Melnikov, P. N. Brunkov: **From graphene oxide towards aminated graphene: facile synthesis, its structure and electronic properties**, Scientific Reports 10 (2020) 6902
- M. V. Baidakova, R. Carley, R. Gort, G. Grubel, L. Le Guyader, E. Jal, E. Yu. Lobanova, L. Mercadier, G. Mercurio, S. L. Molodtsov, L. Muller, A. Philippi-Kobs, D. Potorochin, M. Riepp, W. Roseker, A. Scherz, J. Schlappa, S. M. Suturin, B. Van Kuiken, A. Yaroslavtsev, I. I. Pronin: **Ultrafast dynamics of spatial magnetic fluctuations in Co/Pt multilayers studied at European XFEL**, Proceedings International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020, 9285794



---

## KONFERENZBEITRÄGE

### Verbindungshalbleiter und Festkörperspektroskopie

T. Leisegang, F. Meutzner, T. Nestler, M. Zschornak, W. Münchgesang, R. Schmid, M. Herrmann, M. Rothenberger, T. Köhler, H. Nguyen Dang Duc, A. A. Kabanov, R. A. Eremin, V. A. Blatov, D. C. Meyer: **The aluminum battery – challenges and materials**, International Battery Association – IBA 2020, Bled, Slowenien, 17.–18. November 2020, Poster

M. Nentwich, C. Richter, M. Zschornak, T. Weigel, D. Novikov, D. C. Meyer: **Analysis of Ferroelectric Strontium Titanate Thin Films with Resonant X-ray Diffraction**, Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020, Wrocław, Polen, 24.–27. Februar 2020, Vortrag

T. Weigel, C. Richter, M. Nentwich, M. Zschornak, D. C. Meyer: **Characterization of dynamic thermal displacements of yttrium manganese oxide**, Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020, Wrocław, Polen, 24.–27. Februar 2020, Vortrag

C. Ludt, M. Zschornak, D. C. Meyer: **Interactions of Ruddlesden-Popper Phases and Migration-Induced Field-Stabilized Polar Phase in Strontium Titanate**, Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020, Wrocław, Polen, 24.–27. Februar 2020, Vortrag

M. Zschornak, M. Nentwich, D. C. Meyer, A. Kirfel, K. Fischer: **Advances in the Parameter Space Concept for Crystal Structure Determination – use of neutron diffraction data and resolution study**, Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020, Wrocław, Polen, 24.–27. Februar 2020, Poster

- M. Zschornak: **Phase Transitions in Functional Oxides**, Workshop on Crystal Phase Transitions due to Electric Fields and Standing Acoustic Waves, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moskau, Russland, 21.–25. Januar 2020, eingeladener Vortrag
- T. Weigel: **Synchrotron sample chamber for in-situ experiments**, Workshop on Crystal Phase Transitions due to Electric Fields and Standing Acoustic Waves, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moskau, Russland, 21.–25. Januar 2020, Vortrag
- C. Ludt: **Interactions of Ruddlesden-Popper Phases and Migration-Induced Field-Stabilized Polar Phase in Strontium Titanate**, Workshop on Crystal Phase Transitions due to Electric Fields and Standing Acoustic Waves, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moskau, Russland, 21.–25. Januar 2020, Vortrag
- T. Leisegang, T. Nestler, F. Meutzner, R. Eremin, A. Kabanov, V. Blatov: **Algorithms for the identification and evaluation of crystalline ion conductors**, 30. Seminar des Arbeitskreises Elektrochemie in Sachsen, Freiberg, 7. Februar 2020, Vortrag
- T. Leisegang: **On the storage of electrical energy**, Plenarsitzung der Sächsischen Akademie der Wissenschaften in Leipzig, 10. Januar 2020, Plenarvortrag

## Strukturforschung mit XFELs und Synchrotronstrahlung

- S. Molodtsov: **Brighter than Billion of Suns**, Public Lectures "Academy to Universities", Moscow, Russia, 24. Juni 2020, Vortrag
- S. Molodtsov: **Brighter than Billion of Suns: European X-rays Free Electron Laser**, "Open Science" Workshop at University ITMO, St. Petersburg, Russland, 6. Februar 2020, Vortrag
- F. Roth: **Dynamics of interfacial electron-hole separation in an organic heterojunction monitored by femtosecond time-resolved X-ray photoelectron spectroscopy**, DESY User Meeting, Hamburg, 27.–31. Januar 2020, Poster
- F. Roth: **New insights into the modeling of the laser-assisted photoelectric effect from solid state surfaces**, DESY User Meeting, Hamburg, 27.–31. Januar 2020, Poster



---

## GRADUIERUNGEN UND STUDENTISCHE ARBEITEN

Yen Ming Li: **Current collectors for high energy density lithium-ion batteries**, Problemorientierte Projektarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2020

Huy Duc Nguyen Dang: **Synthese und Charakterisierung von Kathodenmaterialien für Aluminium-Ionen-Akkumulatoren**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2020

Sven Grimm: **Thermoelektrische Eigenschaften von  $\text{In}_{1-x}\text{In}_2\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$  Thiospinellen**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2020

Luis Wolf: **Untersuchung der Stabilität von Silizium-Metall-Anoden für Lithium-Ionen-Batterien**, Bachelorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2020

Amir Mohammad: **Charakterisierung der piezoelektrischen Eigenschaften der migrationsinduzierten feldstabilisierten polaren Phase von Strontiumtitanat**, Masterarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2020

Melanie Nentwich: **Die Struktur der Seltenerd-Übergangsmetall-Silizide**, Doktorarbeit, Institut für Experimentelle Physik, TU Bergakademie Freiberg, 2020



---

## AUSZEICHNUNGEN

Matthias Zschornak: **Max-von-Laue-Preis der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie** in Anerkennung seiner methodischen Weiterentwicklung der Resonanten Röntgenstreuung zur Sichtbarmachung von Orbitalen und seiner Arbeiten zur Defektmigration und -separation in Oxiden unter Einfluss externer Felder. Das Foto zeigt die Verleihung des Max-von-Laue-Preises auf dem *Joint Polish-German Crystallographic Meeting 2020* in Breslau durch den Vorsitzenden der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie Prof. Ralf Ficner (links) nach einer Laudatio von Prof. Wolfgang Neumann (rechts) an Dr. Matthias Zschornak (mittig).

Amir Mohammad: **DAAD-Preis für internationale Studierende der TU Bergakademie Freiberg** für sein besonderes gesellschaftliches Engagement und seine hervorragenden Studienleistungen im Rahmen seines Masterstudiums Angewandte Naturwissenschaft.





---

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Prof. Dr. Dirk C. Meyer  
TU Bergakademie Freiberg  
Direktor des Instituts für Experimentelle Physik  
Leipziger Straße 23  
09599 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).

### Titelbild

Elektrochemische Zelle zum anodischen Oxidieren von Titan-Folie im Chemielabor der Arbeitsgruppe Meyer des Instituts für Experimentelle Physik an der TU Bergakademie Freiberg, © Shuvrodev Biswas.

**Autoren**

- 1–2 Dirk C. Meyer  
 5–10 Hartmut Stöcker  
 13–17 Dirk C. Meyer, Hartmut Stöcker  
 18–19 Roman Gumeniuk, Manuel Feig  
 20–25 Serguei Molodtsov, Friedrich Roth  
 26–33 Tilmann Leisegang  
 34–35 Hartmut Stöcker  
 36–37 Matthias Zschornak, Tina Weigel  
 38–45 Dirk C. Meyer, Theresa Lemser,  
 Heinle, Wischer und Partner Freie Architekten  
 47–49 Thomas Köhler, Hartmut Stöcker  
 50–51 Tilmann Leisegang  
 52–54 Tina Weigel, Christian Ludt, Matthias Zschornak  
 56–57 Tina Weigel, Matthias Zschornak  
 58–63 Tilmann Leisegang, Juliane Hanzig,  
 Oliver Schmidt, Felix Bräuer  
 65–66 Manuel Feig  
 67–71 Mateo de Vivanco, Claudia Funke  
 72–82 Hartmut Stöcker

**Bildquellen**

- 1 Medienzentrum TU Bergakademie Freiberg  
 5 Sven Jachalke  
 7 Sven Jachalke, Hartmut Stöcker  
 8 Thomas Köhler  
 9 Sven Jachalke, Thomas Köhler  
 10 Sven Jachalke  
 11 Juliane Hanzig, Uta Fischer, Claudia Funke  
 13 Hartmut Stöcker  
 15 Sven Jachalke  
 16 Thomas Köhler  
 18 Manuel Feig  
 19 Volodymyr Levytskyi  
 20 European XFEL GmbH  
 21 Sven Jachalke  
 22 Berkeley Lab  
 23–24 European XFEL GmbH  
 25 Friedrich Roth  
 26 Sven Jachalke  
 27–28 Tilmann Leisegang  
 29 Tilmann Leisegang, Sven Jachalke  
 30 Tilmann Leisegang  
 32 Tilmann Leisegang, Sven Jachalke  
 33 Tilmann Leisegang  
 34 Sven Jachalke  
 35 Tilmann Leisegang, Juliane Hanzig, Tina Weigel  
 36–37 Melanie Nentwich  
 38 Heinle, Wischer und Partner Freie Architekten  
 39–40 Cinector GmbH  
 41 Sven Jachalke  
 42–44 Heinle, Wischer und Partner Freie Architekten  
 45 Axel Anklam  
 47–49 Thomas Köhler  
 50 Uta Fischer  
 51 Tilmann Leisegang  
 52 Anton Kulikov  
 53 Christian Ludt  
 54–56 Tina Weigel  
 57 Carsten Richter, Melanie Nentwich  
 58 Sven Jachalke  
 59 Tilmann Leisegang, Falk Meutzner  
 60 Juliane Hanzig, Uta Fischer, Claudia Funke  
 61 Hartmut Stöcker  
 62–63 Oliver Schmidt  
 65 Manuel Feig  
 66 Hartmut Stöcker  
 67 Amy Rouinfar, Mike Dubson  
 68–69 Mateo de Vivanco, Claudia Funke  
 71–72 Juliane Hanzig  
 75–81 Sven Jachalke  
 82 Norbert Sträter  
 84 Sven Jachalke

