



ACAMONTA

Zeitschrift für Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg

20. Jahrgang 2013

Editorial

Ressourceneffizienz ist eine zentrale globale Herausforderung des 21. Jahrhunderts. Sich ihr erfolgreich zu stellen, verlangt fundierte, auch in der weiteren Zukunft tragfähige Entscheidungen und Handlungsansätze, die – ausgehend von einer konsequent Ökologie, Ökonomie und Soziales einbeziehenden Analyse der vielfältigen Verflechtung von Ressourcen- bzw. Stoffströmen untereinander – neuartigen Strategien, Produktlinien, Prozesstypen und Technologien zum Durchbruch verhelfen. Priorität haben dabei solche, die dazu beitragen, den „ökologischen Fußabdruck“ der Erdbevölkerung zu minimieren, in summa also diesem Kernaspekt des Effizienzgebots genügen. Den Wissenschaftlern der TU Bergakademie Freiberg ist stets bewusst: Auf von ambitionierter Forschung gebahnten Wegen muss ein schonender, auf Dauer vertretbarer Umgang mit den Ressourcen, insbesondere die perpetuierliche (v. Carlowitz), gesicherte Verfügbarkeit und der weitsichtig geplante Einsatz von Rohstoffen in die gesamtwirtschaftlichen Substanzkreisläufe sowie für die Energieerzeugung erreicht werden. In diesem Kontext kommt der wirtschaftlich-technischen Planung entlang der sog. Wertschöpfungsketten in den oft stark miteinander vernetzten Einsatzbereichen und Kreislaufzyklen der Rohstoffe und Funktionsmaterialien eine Schlüsselrolle zu. Die Bundesregierung verabschiedete Ende des Jahres 2012 ein Ressourcen-Effizienzprogramm. Ressourceneffizienz ist auch auf EU-Ebene zu einem wichtigen Bestandteil der europäischen Wirtschafts- und Umweltpolitik geworden. Eine hohe Energie-, Material- und Ressourcenproduktivität schafft auch die Basis für einen ökologischen „New Deal“. Die mit der Zukunft der Energieversorgung verbundenen besonderen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen werden im Beitrag von Georg Unland eindrücklich prominent artikuliert. Unternehmen der Energieversorgungsbranche sehen sich mit einer Vielzahl von Risikofeldern konfrontiert, die ein adäquates, frühzeitig ansetzendes Controlling notwendig machen (Rohleder/Rogler). Die TU Bergakademie mit dem Profil der Ressourcenuniversität bietet in Forschung und Lehre das genau passende Umfeld für die Entwicklung zukunftsfähiger Ideen und für Innovationen entlang der besagten Wertschöpfungsketten. Ihre hohe Kompetenz in Fragen eines rohstoffstrategischen, auf Ressourceneffizienz zielenden Vorausdenkens wird in diesem Heft durch zahlreiche Beiträge ein weiteres Mal eindrucksvoll belegt. Überzeugende Konzepte, wie sie unsere Universität – immer auf den Leitgedanken „Nachhaltigkeit“ gestützt – in den Aktionsfeldern Rohstoffgewinnung/ verbesserte Geotechnologien/ Energie- und Materialeffizienz/ Umweltschutz entwickelt und verfolgt, erschließen sich dem Leser insbesondere in den Beiträgen zur Wertschöpfungskette „Kohlenstoff“ (Arbeitskreise B. Meyer, Volkmann, Otto, Drebenstedt, Repke, Kureti, Aneziris). Die dort geschilderten Aktivitäten mit dem Fokus auf die stoffliche Nutzung der Braunkohle knüp-

fen an die naturgegebenen Synergien zwischen Energie- und Stoffwirtschaft an und indizieren ein Zusammenrücken beider Branchen: Die stoffliche Verwertung ursprünglich nahezu ausschließlich energetisch genutzter Rohstoffe erreicht einen immer größeren Umfang. Perspektiven der Nutzung nichtkonventioneller Naturressourcen für die Energieversorgung (Shale Gas, Erdwärme) werden in einer detaillierten Betrachtung von Fracking-Prozessen aufgezeigt (Kretzschmar/Amro). Die Entwicklung von ultraharten Werkstoffen mit Potenzen für den Einsatz zur Gesteinszerstörung in der Tiefbohrtechnik hat in den vergangenen fünf Jahren erfolgreicher interdisziplinärer Forschungsarbeiten im Freiburger Hochdruckforschungszentrum – großzügig gefördert durch die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung – starke Impulse bekommen (Kortus).

Der inzwischen enge Verbund mit dem 2011 gegründeten Helmholtz Institut für Ressourcentechnologie Freiberg trägt erste Früchte. Innovative Technologien zielen auf effiziente Verfahren zur Gewinnung sog. Strategischer Metalle und Minerale (Gutzmer, Schulz, Seifert, Bertau). Hier reiht sich auch der unmittelbar bevorstehende Start der Gewinnung von Flussspat in sächsischen Gefilden ein (Schilka), an dessen Erfolg mehrere Absolventen unserer Universität unmittelbar Anteil haben. Höffigkeitsprognosen auf der Basis von mathematischen Modellen erleichtern das Auffinden einer Lagerstätte offenbar wirksam (Schaeben). Projekte zur Steigerung der Ressourceneffizienz müssen grundsätzlich einer ganzheitlichen Bewertung der in Rede stehenden Technologien sowie einer Technikfolgenabschätzung unterworfen werden (Nippa). Hierfür heranzuziehen ist auch die wissenschaftliche Analyse der Rohstoffpreiseentwicklung (Rogler).

Der Einzug von Nachhaltigkeitsstrategien bei den Finanzintermediären der Kredit- und Versicherungsgesellschaft (Horsch) ist ein Beleg dafür, dass das Nachhaltigkeitsprinzip immer intensiver die Funktionsbereiche unserer Gesellschaft durchdringt und deren Leitbilder mitbestimmt – ganz im Sinne der von Hans Carl von Carlowitz 1713 in seinem Werk „Sylvicultura Economica – Anweisungen zur wilden Baumzucht“ niedergelegten Gedanken. Mit der Festveranstaltung aus Anlass des 300. Jahrestags des Erscheinens dieses bedeutsamen Buches und der 4. Carl-v.-Carlowitz-Vorlesung des Rates für Nachhaltige Entwicklung an unserer Universität haben seine Schlussfolgerungen eine besondere Würdigung erfahren. Auszüge aus dem Jahresbericht 2012 des Rektors, eine Analyse zur Qualitätssicherung in der Lehre (Rogler), Mitteilungen zu einigen für die Bergakademie bedeutsamen Neuigkeiten und Bestrebungen sowie über das Vereinsleben und schließlich Wissenswertes aus der Historie unserer alma mater (Stoyan, Oettel) ergänzen den – wie es sich gehört – Lehre und Forschung gewidmetem Hauptteil dieses Heftes in gewohnter Weise.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerhard Roewer, Redaktionsleiter

Vorwort des Rektors (B. Meyer) 4

Aus Wirtschaft, Wissenschaft und Technik

Ressourcenwende hin zur Low Carbon Economy
(H. Gutte, B. Meyer) 5

Energiequellen – Die Chancen einer nachhaltigen
Energieversorgung (G. Unland) 7

Risikomanagement bei Unternehmen der Energieversorgungs-
branche – Identifizierung möglicher Risikofelder
(S. Rohleder, T. Nell) 17

Die Auswirkungen einer Rohstoffpreisbaisse auf den Firmenwert
von Bergbauunternehmen – Eine Analyse ausgewählter
Geschäftsberichte (S. V. Straub, M. Tettenborn, S. Rogler) . 19

Ganzheitliche Technologiebewertung und Technikfolgen-
abschätzung in Projekten zur Steigerung der
Ressourceneffizienz (M. Nippa, K. Schneider) 21

Heimische Geopotenziale I – Wertstoffe aus Bergbauhalden
(I. Osbahr, J. Gutzmer et al.) 25

Heimische Geopotenziale II – E3 – Rohstofferkundung im Erz-
gebirge mittels Geophysik (I. Osbahr, J. Gutzmer et al.) ... 28

Erzminerale sehen heißt verstehen – Automatisierte
Mineralogie und ihre Anwendung (B. Schulz, J. Gutzmer) ... 30

Lithium-Erkundung in Zinnwald, Osterzgebirge
(J. Nebler, T. Seifert, J. Gutzmer, A. Müller, S. Stute,
J. Henker, K. Kühn) 33

Reaktivextraktion mitteldeutscher Braunkohlen mit überkritischem
Ethanol (H. Wollmerstädt, T. Kuchling, S. Kureti) 68

Co-Pyrolyse von Kohlen und Biomassen Möglichkeiten
für die stoffliche Nutzung
(D. Reichel, S. Krzack, J. Friedemann) 74

Entwicklung einer neuen Technologie zur Herstellung
von hochoktanigem Benzin aus Synthesegas
(P. Seifert, B. Meyer, M. Kuschel, J. Engelmann) 78

Virtualisierung von Hochtemperaturprozessen am ZIK
VIRTUHCON (S. Guhl, A. Richter, C. Hasse, B. Meyer) ... 80

Ressourceneffizienz am Beispiel multifunktionaler keramischer
Filter für die Metallfiltration (SFB 920)
(U. Fischer, M. Emmel, S. Dudczig, C. G. Aneziris) 85

Ressourceneffizienz im Feuerfestbereich
(N. Brachhold, S. Dudczig, V. Roungos, C. G. Aneziris) .. 90

Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge, Ein Rück-
und Ausblick mit einer Prise Fantasie (J. Matschullat) 93

Fünf Jahre Freiburger Hochdruckforschungszentrum (J. Kortus) . 99

Nachhaltigkeitsstrategien in der deutschen Assekuranz
(C. Steinborn, J. Kleinow, A. Horsch) 103

Das EU-Projekt SHIFT-X (D. Walther) 106

Aus dem Vereinsleben

Aus dem Protokoll der Jahresmitgliederversammlung 2012 108

Wesentliche Vereinsaktivitäten im laufenden Jahr 2013 109



BGR-Hubschrauber mit MEM-Sonde (Foto: BGR)

Lithium-Gewinnung aus Zinnwaldit
(C. Pätzold, G. Martin, M. Fuhrland, M. Bertau) 37

Erschließung der Lagerstätte Niederschlag und
Aufbereitung von Flussspat (W. Schilka) 38

Mathematische Modelle der Höffigkeitsprognose
(H. Schaeben) 41

Fracking zur Gewinnung unkonventioneller Erdgas-Erdöl-
Vorräte und geothermischer Energie aus tiefen
Felsgesteinen (H.-J. Kretzschmar, M. Amro, S. Wagner) ... 46

Das Bündnis ibi: Innovative Braunkohlen-Integration
(C. Drebenstedt, M. Pfütze) 52

Quo vadis Kohlengeologie? (N. Volkmann) 53

Ionenzyklotron- und kernmagnetische Resonanz-Spektrometrie
zur Kohleanalytik (M. Kroll, M. Schmidt, E. Brendler,
D. Bauer, P. Rathsack, B. Wolf, M. Otto) 54

Ansätze für den Einsatz von Sensortechnologie zur
qualitätsgerechten selektiven Gewinnung in
Braunkohlentagebauen (M. Pfütze, C. Drebenstedt) 58

Herausforderungen und neue Lösungswege für eine nachhaltige
Braunkohlenextraktion (V. Herdegen, M. Wollmerstädt,
F. Fehse, H.-W. Schröder, J.-U. Repke) 62

Alumni-Beauftragte stärkt den Absolventenkontakt
zu ihrer Alma Mater. 110

Bernhard-von-Cotta-Preis 2012:
Die Styrol-Monooxygenase von *Rhodococcus opacus* ICP –
Ein neuer Typ von Flavin-Monooxygenasen (D. Tischler) ... 110

Simulation des Verformungsverhaltens laserfertigter
Karosseriestrukturen (M. Wagner) 112

Strukturbestimmung von ausgewählten Seltenerdmetall-
Verbindungen unter Nutzung der DAFS-Methode
(M. Nentwich) 114

Auslandspraktikum Chile/Argentinien (L. Luthardt, D. Falk) .. 115

Obsidian-Probenahme in Chile (S. Siegel) 116

Fachexkursion 2013 nach Österreich 117

Beregnungsexperimente in Brasilien (N. Schultze) 118

Rasterelektronenmikroskopie: Experten diskutieren
in Freiberg den Stand der Technik (S. Martin) 120

Nebel und Tau (S. Schüttauf) 120

Universität aktuell

Entscheidungen, Initiativen, Projekte – Auszug aus dem
Rektoratsbericht der TU Bergakademie Freiberg 2012. 121

Russisch-Deutsche Ressourcenuniversität soll Rohstoffkooperation stärken 130

Qualitätssicherung in der Lehre – Ein Feedback durch unsere Studierenden (**S. Rogler, S. Preiss**) 130

Vorteile des einstufigen Studiensystems: Bergakademie führt neue Diplomstudiengänge ein 132

Brücken zwischen Wirtschaft und Wissenschaft – Förderprogramme der Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg (**I. Frey, K. Borrmann**) 133

„Entdecker“ der Nachhaltigkeit mit Festakt und Relief geehrt .. 134

Stipendium für junge Wissenschaftlerinnen 134

Freiberger Forschungsforum:
64. Berg- und Hüttenmännischer Tag 135

Energiewende erfordert intelligente Systemlösungen aller Energien 135

Elektroauto zu Forschungszwecken 135

Farbige Fluoritkristalle aus dem Schwarzwald für die Mineralogischen Sammlungen der TU Bergakademie (**A. Massanek, U. Kempe, G. Heide**) 136

Freiberger Gießer stellen Völkerschlacht-Medaillen aus alten Kanonenkugeln her 138

Leben in den Grenzen unseres Planeten (**N. Pohl**) 139

Die Indium-Germanium-Bronzeplatte auf dem Schloßplatz (**H. Stöcker, D. Stoyan**) 140

Trondheim und Freiberg: vertraute Klänge (**B. Seidel**) 142

Personalia

Kandidaten der Dekanwahlen mit Mehrheit angenommen 175

Prof. Silvia Rogler ist neue Prorektorin für Bildung 175

Bergakademie nimmt Prof. Kurt Biedenkopf und Prof. Karl-Ulrich Köhler in den Hochschulrat auf 175

Neuberufungen:
Heisenberg-Professor will weiteres Forschungsfeld an der Bergakademie etablieren 176

Russischer Professor verstärkt internationales Profil der Bergakademie 176

Neuer Mathematik-Professor sieht viele Anknüpfungspunkte an Ingenieurwissenschaften 176

Professor für Aufbereitungsmaschinen will für den Ingenieurberuf begeistern 177

Juniorprofessor für Chemie ab September an der TU Bergakademie Freiberg 177

Recyclingexpertin für Forschung und Lehre in Freiberg mit gemeinsamer Berufung 177

Ehrendoktorwürde an einen Pionier der Braunkohlenindustrie Mitteldeutschlands 178

Zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Georg Unland (**B. Seidel, C. Drebenstedt, M. Schlömann**) 178

Klaus-Ewald Holst zum 70. Geburtstag (**R. Schmidt**) 183

Zum 70. Geburtstag von Prof. Hans-Jürgen Kretzschmar (**V. Köckritz, H. Krause G. Roewer**) 183



Eckardt/Miländer / TU Bergakademie Freiberg

Historie

100. Geburtstag von Werner Lange (**G. Jäckel, C. Wegerdt**) .. 144

Der andere Gellert – Zum 300. Geburtstag von Christlieb Ehregott Gellert (**M. Haustein**) 145

Zum 50. Todestag von Rektor Professor Dr. Günther Hollweg (**N. Pohl**) 151

Wie gut kennen wir Friedrich Wilhelm von Oppel? (E. Wegert) .. 152

Zum 200. Geburtstag von Prof. August Theodor Scheerer (**E. Menzel**) 155

Zum 175. Todestag von Sigmund August Wolfgang Freiherr von Herder (**G. Grabow**) 156

20 Jahre SAXONIA FREIBERG-STIFTUNG (**K.-H. Eulenberger**) 157

80 Jahre RRSB-Verteilung (**D. Stoyan**) 159

Modellgeschichten, Teil 2:
Ein Pferdegöpelmodell überdauert die Zeit (**F. Jentsch**) ... 161

Zur Geschichte der Röntgenografie an der TU Bergakademie, Teil 2 (**Autorenkollektiv unter Leitung von H. Oettel**) ... 162

Johann Sebastian Bach und der Ursula-Erbstollen, Teil 2 (**E. Spree**) 168

Chronik 2014 (**R. Volkmer, N. Pohl**) 173

Geburtstage unserer Vereinsmitglieder 184

Freiberg trauert um Wegbereiter des modernen Halbleiterstandorts: Dr. Werner Freiesleben 187

Professor Dr.-Ing. habil. Peter Sitz verstorben (**M. Walde, F. Häfner, K.-H. Eulenberger**) 187

Professor Manfred Wünsche verstorben (**W. Pälchen**) 188

Wir trauern um unsere Vereinsmitglieder 189

Buchbesprechungen

„Deutschlands verborgene Rohstoffe“ – eine Buchempfehlung (**J. Matschullat**) 190

Geschichten zur Geschichte: Altrektor Dietrich Stoyan reflektiert sein Leben (**C.-M. Höppner**) 191

Autorenverzeichnis 192

Impressum 192

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die Verbindung von aktuellen Fragestellungen der Wissenschaft und einem facettenreichen Rückblick in die Historie der Bergakademie – dafür steht die Ihnen vorliegende Ausgabe der ACAMONTA. Die Zeitschrift zeigt damit die Ressourcen und Potenziale unserer Hochschule auf, die wir gemeinsam auf dem Weg zum Universitätsjubiläum im Jahr 2015 verstärkt auch in die Öffentlichkeit tragen wollen. Mit dem Auftakt der Festperiode und dem Schwerpunkt Nachhaltigkeit zum „300. Geburtstag“ dieses durch Hans Carl von Carlowitz hier in Freiberg geprägten Begriffs Nachhaltigkeit haben wir im Jahr 2013 wichtige Akzente für die Vermittlung unserer drei zentralen Werte Nachhaltigkeit, Ausstrahlung und Innovation gesetzt. Als deutsche Ressourcenuniversität steht die TU Bergakademie Freiberg im Fokus wichtiger Zukunftsfragen: Die Themenfelder Ressourcen und Rohstoffe stehen weit oben auf der politischen Agenda. Unsere Expertise ist gefragt. Die Artikel in der ACAMONTA zeigen vortrefflich, dass unsere Lehre und Forschung nicht nur eine große wissenschaftliche, sondern auch eine hohe gesellschaftliche Relevanz haben. Darüber hinaus schauen wir weiter voraus, als es in Wirtschaft und Politik möglich ist. So beschäftigen wir uns sowohl mit Chancen und Perspektiven der angestoßenen Energiewende, weiten den Blick aber auch auf die Ressourcenwende und entwickeln dabei Technologien für eine nachhaltige Stoff- und Energiewirtschaft von Morgen. Dafür stehen exemplarisch die gemeinsamen Bemühungen mit dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologien (HIF), der in diesem Jahr gestartete Aufbau des Biohydrometallurgischen Zentrums (BHMZ) für strategische Elemente sowie die nunmehr dritte großtechnische Versuchsanlage für Energierohstoff-Technologien auf dem Gelände der Reichen Zeche. In der Rohstoffstrategie des Freistaates Sachsen wird der TU Bergakademie Freiberg deshalb nicht zu Unrecht eine zentrale Stellung als wissenschaftliches Zentrum in diesem Bereich eingeräumt.

Daneben gewinnt die Internationalisierung an Bedeutung und nimmt an Fahrt auf – auch das geschah 2013 wie selten in der Geschichte der Bergakademie: Die traditionell enge Verbundenheit zum russischen Wissenschaftsraum bekommt zu Beginn des Jahres 2014 mit dem Lomonossow-Haus, einem Apartmenthaus für russische Studenten und Wissenschaftler, hier in Freiberg ein Begegnungszentrum, das nicht nur die deutsch-russischen Beziehungen stärken wird, sondern auch ein Modell für die Zusammenarbeit mit anderen Ländern und Regionen sein kann. Neben der gewachsenen Partnerschaft mit Russland und einem sich gut entwickelnden stetigen Austausch mit Chile und der Mongolei freue ich mich besonders über die verschiedenen Initiativen für eine Wiederaufnahme intensiverer Kooperationen mit afrikanischen Staaten. So besuchten uns zum Beispiel über 30 afrikanische Botschafter, die Bergbauministerin Mosambiks und eine Delegation der zentralafrikanischen Union. Vielen von ihnen ist Freiberg durchaus ein Begriff, studierten doch einige zu DDR-Zeiten an der Bergakademie – hier besteht ein großes Potenzial für eine stärkere Internationalisierung zum Wohle aller, denn die Kooperation im Rohstoffsektor ist ein Schlüsselement für die Selbstbestimmung und den wirtschaftlichen Aufschwung dieses Kontinents.

Die Internationalisierung schlägt sich zunehmend auch bei den Studierendenzahlen nieder: Die Anzahl der Studenten mit aus-



ländischen Wurzeln steigt, die mit regionaler Herkunft nimmt eher ab. Unsere Anziehungskraft gewinnen wir aus einer von gegenseitigem Verständnis und Teamgeist geprägten familiären Atmosphäre, dafür setzen sich alle Mitarbeiter der Bergakademie ein – auch unter schwierigen Bedingungen. So werden unsere Erstsemester durch Mentoren und Tutoren von Anfang an betreut; vor dem Studienbeginn gibt es bereits Mathematik- und Chemiekurse. Die Zufriedenheit und Verbundenheit mit der Bergakademie sind sehr hoch. Dafür sprechen hervorragende Ranking-Ergebnisse der Studienbereiche der Geowissenschaften, des Maschinenbaus oder der Verfahrenstechnik. Letztere stehen auch für eine Veränderung in der Lehre, haben wir uns doch entschlossen für sie wieder den Abschluss eines Diplom-Ingenieurs anzubieten. Die positiven Rückmeldungen aus der Wirtschaft und die guten Einschreibezahlen bei den Erstsemestern bestärken uns darin, diesen Weg weiter fortzuführen ohne dabei die Bologna-Reform infrage stellen zu wollen. In einem härter werdenden Wettbewerb um die besten Köpfe ist es schließlich existenziell, seine Alleinstellungsmerkmale – und davon hat die Bergakademie reichlich – gut zu positionieren.

Dabei soll uns auch das Universitätsjubiläum im Jahr 2015 helfen. Auf dem Weg dorthin haben wir in diesem Jahr die Festperiode eröffnet. Im Oktober konstituierte sich das Festkuratorium, in dem prominente Vertreter aus allen Teilen der Gesellschaft – regional, deutschlandweit oder international agierend – als Botschafter für unser Jubiläum und unsere Zukunftsthemen werben werden. Zudem informiert eine eigens fürs Jubiläum entwickelte Internetseite über alle Veranstaltungen im Kontext des 250. Geburtstags unserer Universität – der ältesten montanwissenschaftlichen Hochschule der Welt und ältesten, ununterbrochen existierenden höheren technischen Bildungseinrichtung im deutschsprachigen Raum!

Ich danke der Redaktion und allen Autoren der ACAMONTA für ihr Engagement, auch in diesem Jahr wieder eine so vielseitige Leistungsschau unserer Universität zusammengestellt zu haben. Verbunden damit ist ein Dank an alle Mitarbeiter und Studierenden unserer Hochschule für ihre Leistungen im zurückliegenden Jahr. Ihr hoher, persönlicher Einsatz ist das Fundament für die Erfolge der TU Bergakademie Freiberg. Zugleich danke ich den Alumni, den Partnern unserer Hochschule sowie den Freunden und Förderern für ihre Unterstützung. Die Bergakademie bildet eine Gemeinschaft, in der alle fest zusammenstehen. Das macht mich zuversichtlich, dass wir die Ressourcenuniversität zum Wohle aller ihrer Mitglieder, unserer Stadt, unseres Landkreises, des Freistaates Sachsen und der Bundesrepublik Deutschland auch in Zukunft weiter gemeinsam erfolgreich voranbringen werden.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Meyer
Rektor der TU Bergakademie Freiberg

Ressourcenwende hin zur Low Carbon Economy

Heiner Gutte, Bernd Meyer

Der globale organische und anorganische Kohlenstoffkreislauf der Natur liefert den „Treibstoff“ allen Lebens. Im Zuge der Austauschprozesse von kohlenstoffhaltigen Verbindungen zwischen den Kohlenstoffspeichern Lithosphäre, Biosphäre und Atmosphäre haben sich im Verlauf der Erdgeschichte die fossilen C-Ressourcen wie Erdöl, Erdgas und Kohle gebildet (Abb. 1).

Ausgehend von der Betrachtung der Erde als ein offenes System, kann ihr Gesamtkohlenstoffgehalt als konstant aufgefasst werden (abgesehen von extraterrestrischen Zu- und Abflüssen von Kohlenstoff bzw. kohlenstoffproduzierenden endogenen Kernreaktionen).

Abbildung 1 illustriert unter Angabe von spezifischen Massen- bzw. Volumenströmen den zeitabhängigen Umfang des Stoffaustauschs zwischen den Kohlenstoffspeichern, der maßgeblich durch die Sonne und – seit der industriellen Revolution – immer intensiver auch anthropogen angetrieben wird.

Derzeit werden fossile und biogene Kohlenstoffträger überwiegend energetisch genutzt, um Elektrizität, Wärme und Kraftstoffe zu erzeugen. Kohlenstoff wird von allen chemischen Elementen mit Abstand am stärksten aus der Lithosphäre entnommen. Die energetische Nutzung fossiler Kohlenstoffträger führt zu einer markanten Veränderung der Umfänge der Stoffmengenströme zwischen den o.g. Kohlenstoffspeichern – insbesondere zu einer Kohlenstoffanreicherung in der Atmosphäre in Form von CO₂. Inzwischen belaufen sich die jährlichen CO₂-Emissionen durch Verbrennung fossiler Rohstoffe und die Zementproduktion auf ca. 7,8 PgC [2].

Die Atmosphäre als kleinster der o.g. Kohlenstoffspeicher reagiert auf erhöhte C-Zuflussraten besonders empfindlich. So gilt unter Klimaexperten die anthropogene Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre als eine der Hauptursachen für den Klimawandel, wobei es dafür durchaus unterschiedliche Interpretationen gibt. Unabhängig davon erscheint es für einen ressourcenschonenden Umgang mit Kohlenstoffträgern unumgänglich, die derzeit dominierende kohlenstoffintensive in eine kohlenstoffarme Wirtschaft zu transferieren (*Low Carbon Economy*). Um den Kohlenstoff-

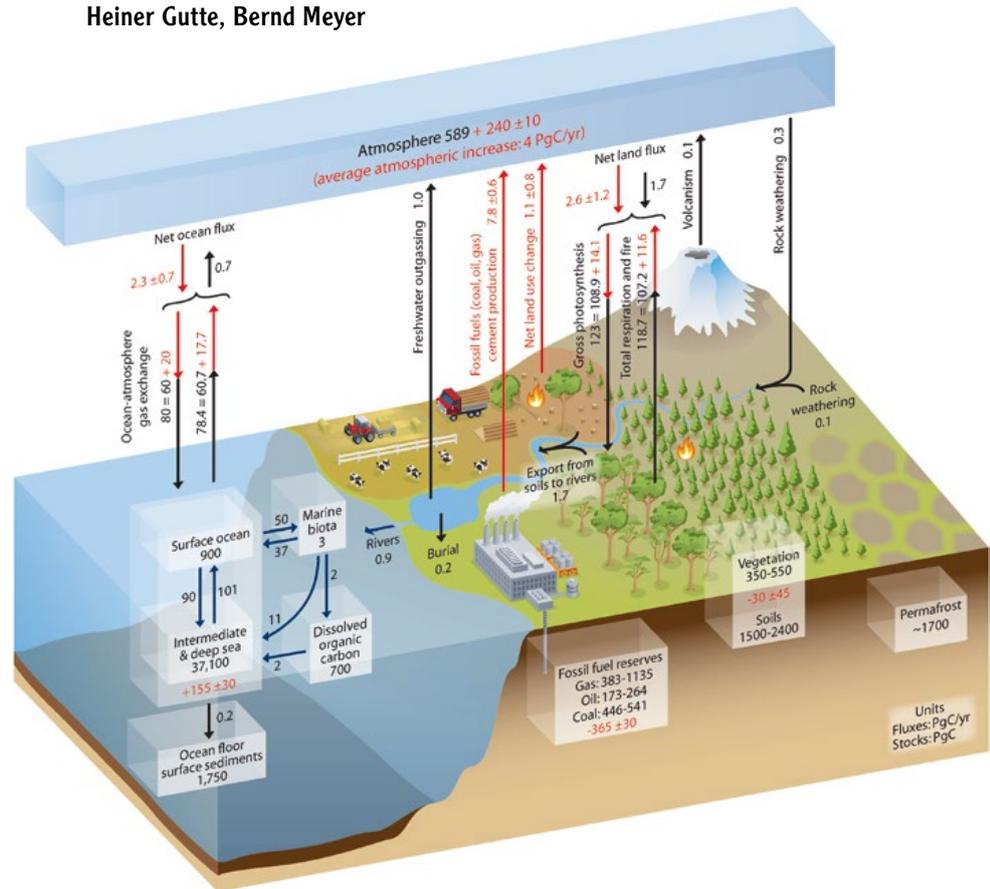


Abb. 1: Globaler Kohlenstoffkreislauf [1]; Schwarze Zahlen/Pfeile beschreiben die Kohlenstoffspeicher in PgC (1 Pg = 10¹⁵ g = 10⁹ t = 1 Mrd. t) und jährliche Stoffaustauschströme in PgC/yr. Rote Zahlen/Pfeile stehen für anthropogene C-Stoffströme, gemittelt über die Zeitperiode zwischen 2000 und 2009.

kreislauf nicht völlig aus dem natürlichen Gleichgewicht zu bringen, sind größte Anstrengungen in nahezu allen Bereichen der Wirtschaft und der industriellen Produktion erforderlich.

Der klassische Ansatz für eine kohlenstoffärmere Wirtschaft besteht in der Anhebung der Ressourceneffizienz. Entweder wird aus der gleichen Menge an Ausgangsstoffen eine größere Energiemenge gewonnen (Energieeffizienz), oder es gelingt, die Produktausbeute zu steigern (Stoffeffizienz). Energie- und Stoffeffizienz sind die kostengünstigsten Hebel, die Versorgungssicherheit mit Energie und Rohstoffen zu verbessern und die Emissionen von Treibhausgasen zu vermindern. Das größte Einsparpotenzial liegt im Energiesektor selbst und in energieintensiven Industriebranchen. Etwa 30 % des Primärenergieverbrauchs der EU entfallen auf die Umwandlung von Energie in Strom und Wärme und auf deren Verteilung bzw. Transport [3]. Große Einsparpotenziale liegen in der Kraft-Wärme-Kopplung, in innovativer

Abwärmennutzung und in der Effizienzsteigerung von Energietechnologien durch Einsatz innovativer Werkstoffe. Der Erhöhung der Effizienz mit klassischen Mitteln sind jedoch naturgesetzliche Grenzen gesetzt.

Schritte zur Low Carbon Economy

Der erste Schritt der Transformation zur Low Carbon Economy besteht im Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energien (Energiewende, Abb. 2).

Die **Energiewende** ist möglich, weil auf ein breites Spektrum an erneuerbaren Energiequellen, die zukünftig im Überschuss zur Verfügung stehen werden, zurückgegriffen werden kann. Dieser mittel- und langfristig zu erwartende Überschuss an erneuerbaren Energien ermöglicht völlig neue technologische Zugänge zur Low Carbon Economy. Im Zentrum steht die Einkopplung erneuerbarer Energien in kohlenstoffbasierte Stoffumwandlungsprozesse, wodurch heute etablierte, überwiegend exotherme Prozesse wie z.B. die Oxidation von

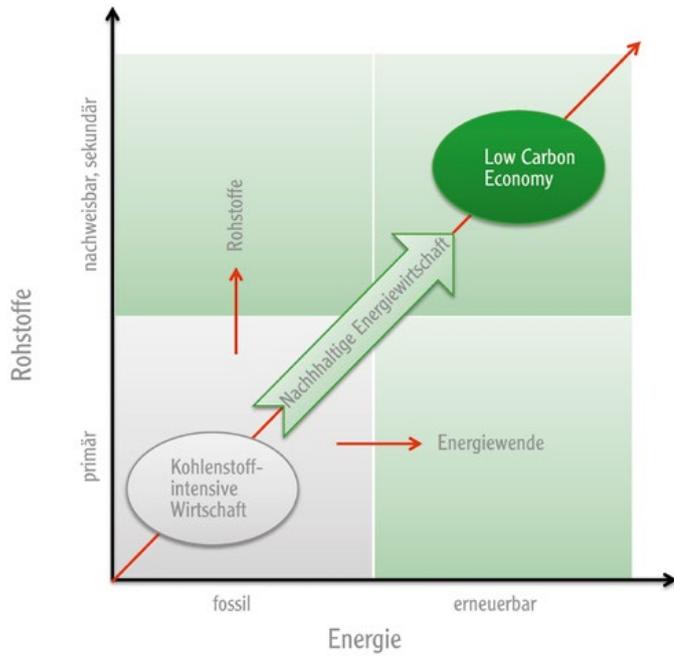


Abb. 2: Übergang von der kohlenstoffintensiven zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft

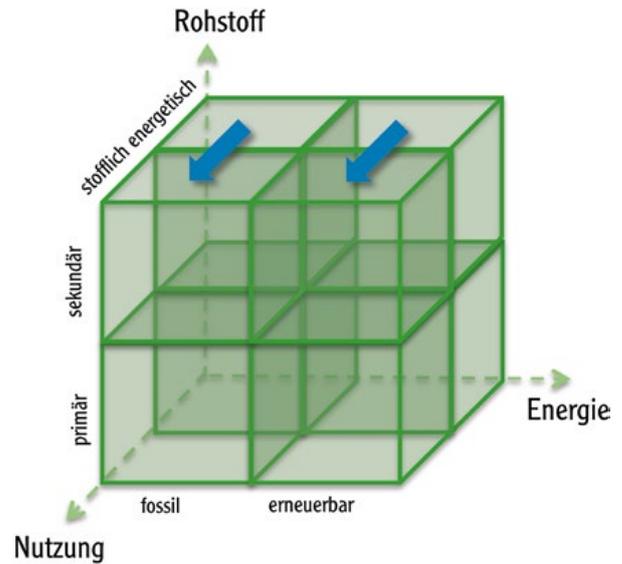


Abb. 3: Ressourcenwende – Übergang von der energetischen zur stofflichen Nutzung von Kohlenstoff unter Einsatz erneuerbarer Energien

Kohlenstoffträgern, zunächst durch CO₂-ärmere autotherme und schließlich durch CO₂-freie allotherme Prozesse mit wesentlich höheren stofflichen und energetischen Wirkungsgraden abgelöst werden können. Beispiele sind mikrowellen- und plasmagestützte Reaktionstechniken oder die Direktstromeinkopplung für thermische Prozesse.

Der zweite Transformationsschritt, die **Rohstoffwende**, besteht in Analogie zur Energiewende im Übergang von primären Rohstoffen zu sekundären bzw. nachwachsenden Rohstoffen (Rohstoffwende, Abb. 2). Die Stoffe werden zunehmend im Kreislauf geführt und durch nachwachsende Rohstoffe ergänzt. Neue Technologien und Stoffkombinationen zur Nutzung kohlenstoffbasierter Produkte mit hohem Recyclingpotenzial bzw. Optionen zur Kaskadennutzung sind zu entwickeln. Begleitend dazu ermöglichen neue Methoden zur Rohstoff- und Produktanalytik die selektive Gewinnung verschiedener primärer und sekundärer Kohlenstoffquellen. Beispiele sind: Selektive Gewinnung unterschiedlicher Kohlequalitäten, Direktnutzung von Naturstoffen, z.B. Xylit für Faserwerkstoffe und Dämmmaterialien, neue Extraktions- und Pyrolyseverfahren für primäre und sekundäre Kohlenstoffträger, die Erzeugung von Synthesegasen aus primären und sekundären Kohlenstoffquellen und die Synthese hochwertiger und energiehaltiger Chemikalien

über regenerativ erzeugten Wasserstoff und fossile bzw. biogene CO₂-Quellen.

Jede chemische Reaktion ist neben der Stoffumwandlung untrennbar mit einer Energiewandlung verbunden. Stoffumwandlungen und einhergehende Energiewandlungen müssen daher im Gesamtzusammenhang betrachtet werden. Demnach sind Energie- und Rohstoffwende unmittelbar aneinander gekoppelt, werden aber bisher isoliert betrachtet. Hier liegt die entscheidende Herausforderung für die **Ressourcenwende**. Die Ressourcenwende ist die Transformation der derzeit dominierenden energetischen hin zu einer stofflichen Nutzung primärer und sekundärer Rohstoffe unter innovativer Nutzung erneuerbarer Energien. Die Art der Nutzung, ob energetisch oder stofflich, bildet eine dritte Dimension (siehe Abb. 3). Die Dimensionen Energie, Rohstoff und Nutzungsart spannen zusammen den Technologieraum auf, in dem die Transformation von einer kohlenstoffintensiven Wirtschaft hin zur Low Carbon Economy stattfinden muss:

- **Energiewende:** fossile Energien → erneuerbare Energien
 - **Rohstoffwende:** primäre Rohstoffe → sekundäre/nachwachsende Rohstoffe
 - **Ressourcenwende:** energetische Nutzung → stoffliche Nutzung
- Erst die stoffliche Nutzung unter Einsatz erneuerbarer Energien ermöglicht

die Absenkung der CO₂-Emissionen auf ein Mindestmaß. Erneuerbare Energien können in Zukunft in elektrothermische und elektrochemische Prozesse eingekoppelt werden und zur Synthese hochwertiger und hochenergiehaltiger kohlenstoffbasierter Chemikalien dienen. Denkbar sind metallurgische bzw. elektrochemische Hochleistungsspeicher für erneuerbare Energien in Gewinnungselektrolysen, beispielsweise über Chlorkalkali- oder Aluminium-Elektrolysen. Eine neue Industriebranche der Energie-Stoff-Transformation entsteht. Sie verbindet die bisher isoliert voneinander agierenden Branchen der Energiewirtschaft, der chemischen Industrie und der Metallurgie, um nur die wichtigsten zu nennen. Der so skizzierte Weg zur Low Carbon Economy hält unseres Erachtens eine der größten Herausforderungen für Wissenschaft und Wirtschaft im 21. Jahrhundert bereit. Deutschland als führendem Technologieland und Initiator der Energiewende kommt dabei eine Schlüsselrolle zu.

Quellen

- 1 Working Group I Contribution to the IPCC fifth Assessment Report „Climate Change 2013: The Physical Science Basis“ 26. September 2013 Stockholm, Sweden
- 2 Estimated by the Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) based on UN energy statistics for fossil fuel combustion (up to 2009) and US Geological Survey for cement production (Boden et al., 2011)
- 3 KOM(2011) 109: Energieeffizienzplan der EU 2011

Energiequellen – Die Chancen einer nachhaltigen Energieversorgung

Georg Unland

Die Menschheitsgeschichte wurde und ist stark durch den Gebrauch der unterschiedlichen Energieträger geprägt. Zunächst basierte die Energieversorgung auf regenerativen Energien. Seit Beginn des Industriezeitalters werden hauptsächlich fossile und seit Mitte des 20. Jahrhunderts zusätzlich nukleare Energieträger genutzt. Bei als gleichbleibend unterstelltem momentanem Verbrauch reichen die Vorräte noch für mehrere Jahrhunderte, wobei nach heutiger Kenntnis das Fördermaximum zunächst für konventionelles Erdöl in wenigen Jahrzehnten und seine dann sich anschließende Verknappung erwartet werden. Die Vorräte an Gas, Kohle und spaltbaren Elementen sind jedoch erheblich größer. Die technische Entwicklung ermöglicht es zunehmend, regenerative Energien in immer größerem Maße zu nutzen. Jedoch ist der Gebrauch von erneuerbaren Energien an Energieflüsse gekoppelt und damit an eine Fläche, so dass der Umfang ihrer Nutzung begrenzt ist. Die notwendige großräumige Energiewandlung ist mit Risiken verbunden, so dass die ökologischen, sozialen und politischen Auswirkungen bisher noch nicht absehbar sind. Deshalb sollten bei der Ausrichtung von Forschung und Entwicklung sowie für die Versorgung der Menschen mit Energie zukünftig weiterhin ausnahmslos alle Energieträger berücksichtigt werden.¹

1 Einleitung

Die gesellschaftlichen Herausforderungen, Auseinandersetzungen und Regelungen zur Energieversorgung sind so alt wie die Menschheit selbst. Das Energieproblem war neben dem der Versorgung mit Nahrungsmitteln immer ein zentrales Thema. In der Zeit bis zur industriellen Revolution konnte der Mensch überwiegend nur im Gleichge-

wicht und im Einklang mit der Natur leben. Auf der Erde konnten so viele Menschen leben, wie sie in der Lage waren, auch regenerative Energien zu nutzen.

Zu dieser Zeit geriet das Gleichgewicht häufig durch Witterungseinflüsse (z. B. Dürreperioden oder nasse und kalte Sommer) oder durch Überinanspruchnahme der Natur (z. B. Überfischung

Erzgebirges. Hanns Carl von Carlowitz entwickelte deshalb zu Beginn des 18. Jahrhunderts ein Konzept einer Lösung und prägte 1713 erstmalig in seinem Buch *Sylvicultura oeconomica* den Begriff Nachhaltigkeit [1] (Abb. 1).

Mit Beginn der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert änderte sich der Verlauf der Menschheitsgeschichte grundlegend. Die industrielle Revolution begann, als der Mensch lernte, fossile Energieträger zu nutzen: zunächst Kohle, dann Öl und später Gas und schließlich ab Mitte des 20. Jahrhunderts noch zusätzlich die nuklearen Energieträger. Die unterschiedlichen Industriezweige, beispielsweise der Maschinenbau oder die Chemie sowie einschlägige Wissenschaftsdisziplinen, insbesondere die natur- und ingenieurwissenschaftlichen, entwickelten sich bis heute zunehmend dynamischer. In der Folge wuchs die Weltbevölkerung und es gab für viele Menschen einen bisher nicht erreichten und für möglich gehaltenen Wohlstand. Grundlage dieser Entwicklung war der steigende Gebrauch von Energie, insbesondere der Einsatz fossiler Energieträger. Heute basiert die Versorgung der Menschheit mit Energie überwiegend immer noch auf der Nutzung fossiler Energieträger mit einem Anteil von über 80 %.

Regenerative Energieträger leisten bisher erst einen Beitrag von nicht einmal einem Siebtel zur Deckung des Weltenergiebedarfs [2, 3, 4] (Abb. 2).

Für viele Menschen, insbesondere in den entwickelten Volkswirtschaften und zusehends auch in den Schwellenländern, ist es heute selbstverständlich, Energie jederzeit in ausreichender Menge und in gewünschter Art zu nutzen, sei es für Beleuchtung und Mobilität oder zum Kochen und Heizen. Deshalb



Abb. 1: *Sylvicultura oeconomica* [1]

oder übermäßigen Holzeinschlag) außer Kontrolle – mit der Folge, dass viele Menschen Not litten und starben.

Diese Krisen waren jedoch häufig ebenso Anlass, weitergehende Konzepte zur Nutzung der Erde zu entwickeln. So entstand die Idee der Nachhaltigkeit aufgrund des Holzmangels infolge übermäßigen Holzverbrauchs für den Grubenausbau und das Feuersetzen beim Erzabbau sowie zur Erzeugung von Holzkohle für die Metallhütten des

¹ Gekürzte Fassung eines Artikels aus AT MINERAL PROCESSING 10 und 12/2012 (Volume 53), S. 56-72 und 60-71.

steigt der Energieverbrauch weiterhin unaufhörlich. In den letzten Jahrzehnten wurde aber auch immer wieder deutlich, dass der zunehmenden Nutzung von Energie Grenzen gesetzt sind. Die Vorräte an fossilen und nuklearen Energieträgern sind begrenzt, und die Auswirkungen der Nutzung derselben sind häufig mit negativen Aspekten verbunden, wie dem Einfluss auf das Klima, die Luft, das Wasser oder die Böden. Die Menschheit lebt nicht mehr im Gleichgewicht und im Einklang mit der Natur. Bisher überdeckte und löste der technische Fortschritt viele negative Folgen der steigenden Energienutzung (z. B. durch Filter- und Rauchgasentschwefelungsanlagen); aber einem wachsenden Teil der Bevölkerung ist bewusst, dass nach nachhaltigen Lösungen des Energieproblems gesucht werden muss und solche hoffentlich auch gefunden werden können. Dabei besteht bei vielen Menschen die Illusion, dass eine zukünftige Energieversorgung ausschließlich auf regenerativen Quellen ohne Beeinträchtigung ihres näheren Umfelds und der Umwelt unter Beibehaltung ihres Wohlstands basieren könnte. Im Folgenden sollen deshalb die Energieproblematik zunächst analysiert und dann mögliche Lösungsszenarien aufgezeigt und bewertet werden.

2 Energiebedarf

Die Energienutzung der Menschen ist lokal höchst unterschiedlich. Abhängig vom Wohlstand, vom Klima und von der Struktur der Volkswirtschaft beträgt der jährliche Primärenergiebedarf pro Einwohner weniger als 10 GJ in vielen Entwicklungsländern, wie in Äthiopien und im Kongo – oder er überschreitet ein Niveau von 100 GJ in den Industrieländern, z. B. in Deutschland und in den USA. Auch wenn es keine exakte Korrelation zwischen Wohlstand und Energiebedarf einer Gesellschaft gibt, ist trendmäßig davon auszugehen, dass die allerorts angestrebten besseren Lebensumstände den Bedarf an Energie erhöhen (Abb. 3). [5, 6]

Selbst die Hoffnung auf den energiesparenden Effekt der Umwandlung einer Industrie- in eine Servicegesellschaft hat sich als volkswirtschaftlicher Irrtum erwiesen, da die nationalen Energiebilanzen aufgrund des mit dem Güterimport zwangsläufig verbundenen indirekten Energieimports (energetischer Fußabdruck) korrigiert werden müssten und auch dessen Intensität (z. B. durch

Abb. 2: Anteil der Energieträger am Weltenergiebedarf (2008)

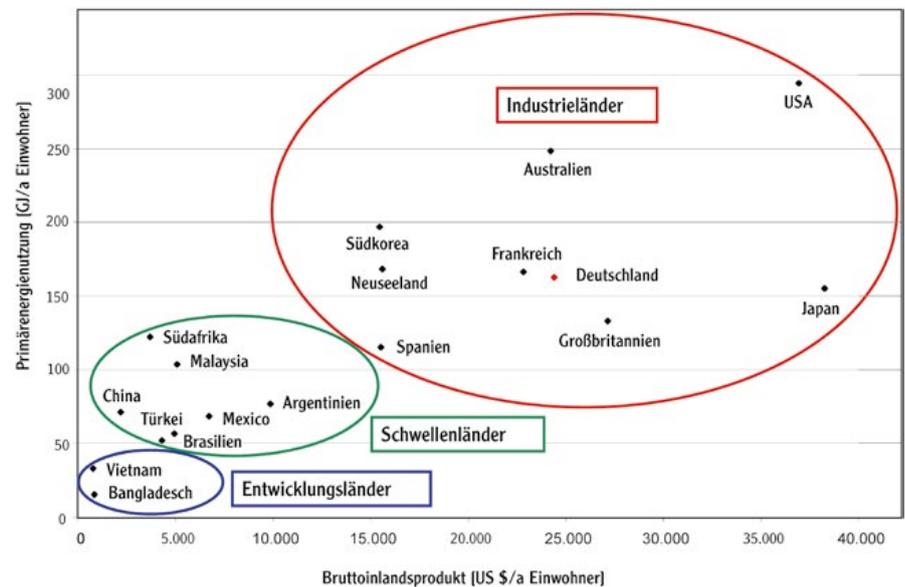
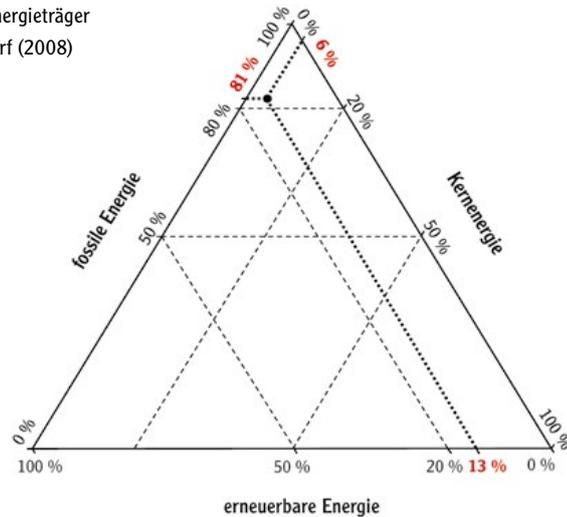


Abb. 3: Energienutzung in Abhängigkeit vom Bruttoinlandsprodukt (2006)

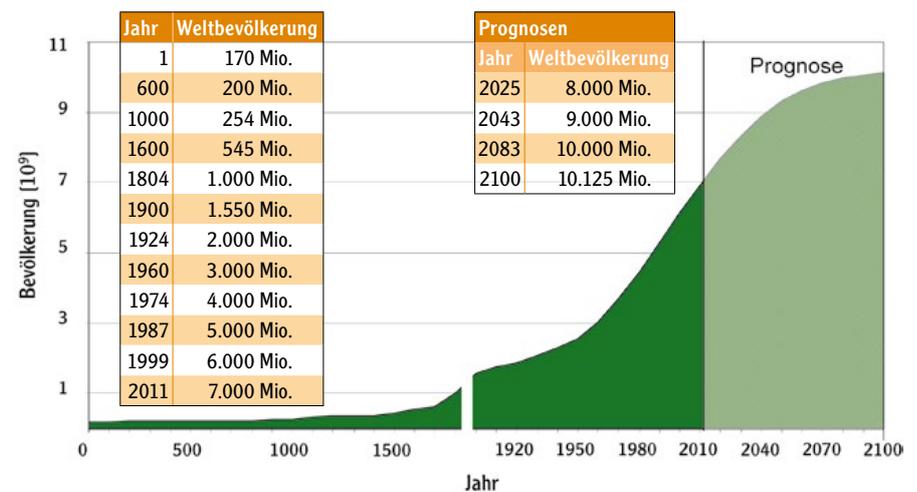


Abb. 4: Weltweite Bevölkerungsentwicklung

teilweise transkontinentalen Gütertransport oder durch Rechner) völlig unterschätzt wurde. Zusätzlich steigert die wachsende Erdbevölkerung, insbeson-

dere in den Entwicklungsländern, den Bedarf. Bis zum Jahr 2050 werden über neun Milliarden Menschen prognostiziert (Abb. 4). [7, 8] Eine reduzierende

Wirkung auf den Energiebedarf hat allerdings die Wirkungsgraderhöhung technischer und volkswirtschaftlicher Prozesse und Systeme. Damit sind aber erhebliche Investitionen verbunden sowie entsprechend angepasste technische und soziale Entwicklungen notwendig. Aus diesen Gründen unterscheiden sich die Prognosen hinsichtlich der Wachstumsraten und der genutzten Primärenergiearten erheblich [siehe z. B. 2, 3, 9, 10, 11, 12]. Sie reichen vom Nullwachstum infolge immer rationellerer Energienutzung bis hin zu Erwartungen, die innerhalb der nächsten 50 Jahre von einer Verdoppelung des Energiebedarfs auf etwa 1.000 EJ/a ausgehen (Abb. 5).

Die Prognosen, die ein Nullwachstum vorhersagen, basieren auf Konzepten, die eine deutliche technische und soziale Effizienzsteigerung der Energiewandlung und des Energiegebrauchs annehmen. Solche Konzepte gehen beispielsweise davon aus, dass die Industrieländer ihre Energieeinsätze pro Kopf stärker reduzieren als die Entwicklungsländer ihre steigern – mit dem Gedanken, dass sich die Intensität der Energienutzung über die Zeit einem gemeinsamen Wert annähert (z. B. Kontraktion-und-Konvergenz-Modell, 2000-Watt-pro-Kopf-Gesellschafts-Modell). Dabei sollen historische Zwischenstufen der Industrieländer in den Entwicklungsländern vermieden und durch Wissens- und Kapitaltransfer Entwicklungssprünge (Leapfrogging-Strategie) ermöglicht werden, d. h. energieintensive Technologien in den Entwicklungsländern erst gar nicht, sondern sogleich die neuesten effizientesten Technologien zum Einsatz kommen. Einhergehen soll damit eine Entkopplung des Energiegebrauchs und des Wirtschaftswachstums bzw. des Wohlstands (Entkopplungs-Strategie). [11] Ohne Bewusstseinsänderung, ohne ein anderes Verständnis von Lebensqualität und Wohlstand wird dieses Ziel – insbesondere in den Industrieländern – nicht erreichbar sein.

Bisherige volkswirtschaftliche Erfahrungen zeigen eher gegenteilige Tendenzen. Energieeinsparungen und die effizientere Nutzung der Energie führen häufig nicht zur Senkung des Gesamtenergieverbrauchs, sondern zur vermehrten Nutzung von effizienteren Technologien und Produkten bzw. zur Erschließung neuer Märkte – mit der Folge, dass das Einsparpotenzial nicht oder nur unvollkommen umgesetzt (Je-

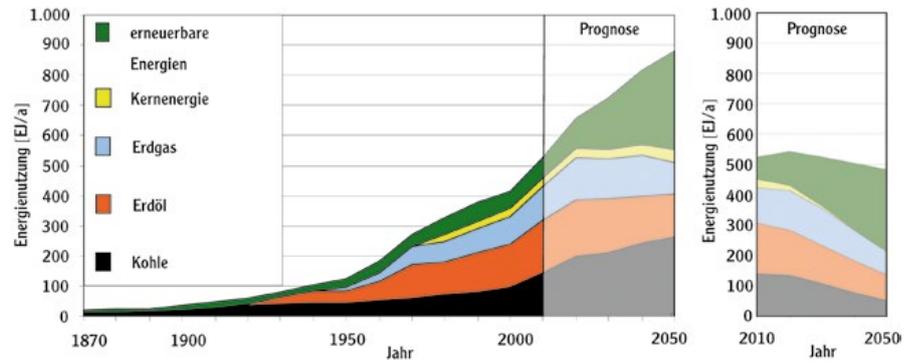


Abb. 5: Weltweite jährliche Energienutzung: links – Wachstumszenario, rechts – Energie(r)evolution-Szenario

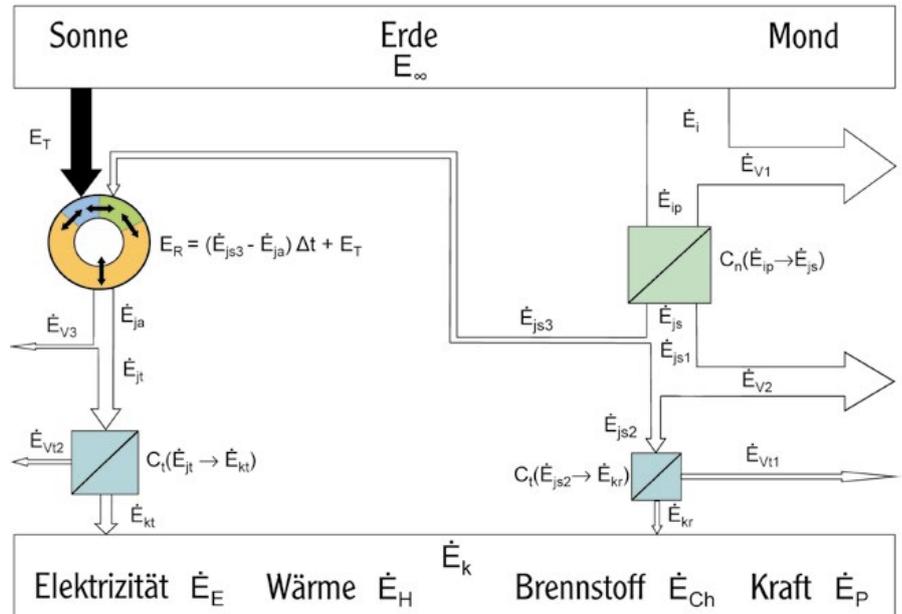


Abb. 6: Energieströme

vons' Paradoxon, Rebound-Effekt) oder sogar durch einen höheren Verbrauch überkompensiert wird (Backfire-Effekt).

Für den Entwurf eines realistischen Szenarios ist deshalb zunächst zu bedenken, dass der Gesamtenergiebedarf \$E_{ges}\$ der Menschheit multiplikativ mit den drei Haupteinflussfaktoren verknüpft ist:

$$E_{ges} = E_B \cdot \frac{e_b \cdot e_w}{e_e}$$

- mit E_B Basisenergiebedarf
- e_b Bevölkerungsfaktor
- e_w Wohlstandsfaktor
- e_e Effizienzfaktor

Unter der Annahme, dass bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Weltbevölkerung von heute sieben auf neun Milliarden Menschen wächst und der Energieverbrauch für ein Drittel der Menschheit gleichbleibt, aber sich für die ärmeren zwei Drittel verdreifacht, müsste sich der Effizienzfaktor mehr als verdoppeln, um den Gesamtenergiebedarf auf heutigem

Niveau konstant zu halten. Diese Annahme ist jedoch unrealistisch. Es ist höchst wahrscheinlich, dass für die überschaubare Zukunft mehr Energie zur Verfügung gestellt werden muss und werden wird. Die zentralen Fragen sind deshalb, wie der wachsende Energiebedarf gedeckt werden kann und in welchem Umfang die einzelnen Energiequellen einen Beitrag dazu leisten können.

3 Energiequellen

Zur Abdeckung des Energiebedarfs stehen unterschiedliche Energiequellen zur Verfügung. Primär dienen die Sonne, die Erde und der Mond als Energiequellen (Abb. 6). Aus deren Energievorräten \$E_\infty\$ wurde und wird die Erdoberfläche ständig mit Energie \$\dot{E}_i\$ in Folge von Strahlung, Wärmeleitung oder wechselnder Gravitation versorgt. Durch natürliche Umsetzung \$C_n\$ mit den verschiedenen Medien, wie Wasser, Luft, Gestein oder Biomasse können diese Energiearten gewandelt werden. Diese Energien,

auch regenerative Energien genannt, sind jedoch direkt oder indirekt an Energieflüsse \dot{E}_{js} gekoppelt.

Eine Sonderstellung nimmt die Kernfusion ein, da der Brennstoff für diese Reaktion de facto unbegrenzt verfügbar ist. [13] Fusionskraftwerke werden jedoch, sofern sie überhaupt großtechnisch realisierbar sind, erst in einigen Jahrzehnten zur Verfügung stehen. Deshalb sollen sie im Rahmen dieser Betrachtung auch nicht weiter berücksichtigt werden.

Fossile und nukleare Energieträger beinhalten Energie E_T , die in der Erdkruste gespeichert ist. Die Speicherung erfolgte mit der Entstehung der Erde durch z.B. Einlagerung von Nukleiden in Gesteinen oder im Verlauf der Erdgeschichte durch Ablagerung und Umwandlung von Biomasse. Auch heute noch wird der Erdkruste Energie \dot{E}_{js3} zugeführt und dort verwahrt, etwa durch Sedimentation von Biomasse oder durch Wärmeeintrag bei Energiefreisetzung infolge radioaktiven Zerfalls. Ein Teil der regenerativen Energie \dot{E}_{js2} und der gespeicherten Energie E_T wird in technischen Prozessen C_t in die von den Menschen am häufigsten genutzten Energieformen Elektrizität \dot{E}_E , Wärme \dot{E}_H , Kraft \dot{E}_P und Brennstoff \dot{E}_{Ch} gewandelt.

Die energiepolitische Diskussion geht nun häufig von der unterschiedlichen Verfügbarkeit der diversen Energieträger aus. Fossile und nukleare Energieträger entstammen Vorräten E_T und sind demzufolge in ihrer Nutzungsdauer begrenzt verfügbar. Regenerative Energien sind zwar relativ – in Bezug auf die zukünftige Menschheitsgeschichte – zeitlich unbegrenzt, aber in ihrer Nutzung trotzdem limitiert. Durch die Kopplung an einen Energiefluss \dot{E}_{js} sind sie abhängig von der Fläche auf der Erde und der Masse der Medien sowie von deren chemischen und physikalischen Parametern. Da diese Größen alle begrenzt sind, ist die Nutzung der regenerativen Energien auch nicht beliebig steigerbar.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die zukünftige Versorgung der Menschheit mit Energie begrenzt ist, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen. Deshalb sollen im Folgenden zunächst die Vorräte E_T an fossilen und nuklearen Energieträgern abgeschätzt sowie die Ströme \dot{E}_{js2} der regenerativen Energien aufgezeigt werden.

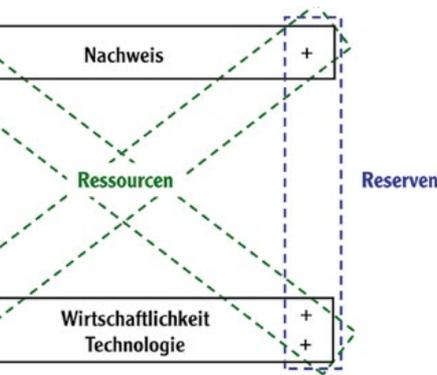


Abb. 7: Vorrattypen

sollen im Folgenden zunächst die Vorräte E_T an fossilen und nuklearen Energieträgern abgeschätzt sowie die Ströme \dot{E}_{js2} der regenerativen Energien aufgezeigt werden.

4 Vorräte

Die Vorkommen einzelner Rohstoffe hängen von der geologischen Konstellation und ihrer Genese ab. Deshalb sind die Rohstoffe auf und in der Erde ungleich verteilt. Die Gesamtheit der Menge eines Rohstoffs wird als Vorrat bezeichnet. Sind diese Vorräte geologisch nachgewiesen sowie technisch und wirtschaftlich gewinnbar, werden diese als Reserven bezeichnet. Ressourcen sind demgegenüber die Vorräte, die geologisch bekannt, aber technisch und wirtschaftlich noch nicht gewinnbar sind oder die technologisch/ökonomisch gewinnbar sein dürften sowie nach geologischem Ermessen zwar zu erwarten, aber noch nicht nachgewiesen worden sind. Die darüber hinaus noch verbleibenden, zum größten Teil noch unbekannt zukünftigen Reserven und Ressourcen werden als Geopotenzial bezeichnet (Abb. 7). [14] Die insgesamt tatsächlich vorhandenen Vorräte an Energierohstoffen im heute und zukünftig zugänglichen Teil der Erde sind unbekannt.

Die Mengen bei den einzelnen Vorrattypen ergeben und ändern sich also in Abhängigkeit von den Preisen, vom Aufwand für ihre geologische Erkundung und vom technologischen Entwicklungsstand. So bedeutet beispielsweise der technische Fortschritt nicht unbedingt ein Anwachsen der Reserven auf Kosten der Ressourcen. War vor 50 Jahren der Abbau von 30 cm starken Steinkohleflözen in Deutschland wirtschaftlich möglich, liegt heute der ökonomisch sinnvolle Abbau infolge der Weiterentwicklung

von Gewinnungstechnologien bei Flözstärken von 60 cm und mehr, d.h. die Reserven sind aufgrund des technischen Fortschritts gesunken. [15]

Die Abgrenzung dieser Vorrattypen sowie die Methoden der Ermittlung der Mengen sind weiterhin international nicht eindeutig festgelegt und variieren von Land zu Land. So werden beispielsweise bei der Beurteilung von Steinkohlevorräten in zahlreichen Ländern – insbesondere in denen, die oberflächennahe Vorkommen in Tagebauen ausbeuten – nur solche bis in eine Tiefe von 300 bis 700 m (Südafrika bis 350 m, USA bis 671 m) erfasst, während in Ländern mit ausgeprägtem Tiefbau Kohle bis 1.800 m Tiefe (Indien bis 1.200 m, Deutschland bis 1.500 m, Ukraine bis 1.800 m) in die Vorratsberechnungen eingeht. [16] Kohle kommt aber auch in weitaus tiefer liegenden Flözen vor, wie unter der norddeutschen Tiefebene. In Bezug auf die Vorratsberechnung gilt Analoges für die Flözmächtigkeit (minimal berücksichtigte Flözdicke: Südafrika 1 m, USA 0,25 m, Indien 1 m, Deutschland 0,6 m, Ukraine 0,55 m).

Nicht zu unterschätzen sind auch strategische oder technologische Überlegungen einzelner Staaten und Unternehmen. So tauchten die Kohlevorkommen von Lübbtheen, obwohl erkundet, zu Zeiten der DDR in keiner offiziellen geologischen Publikation auf, da die entsprechenden Aufbereitungstechnologien noch nicht entwickelt waren. Darüber hinaus haben sich für die einzelnen Energierohstoffe auch noch verschiedene Merkmale zur Abgrenzung der Vorrattypen durchgesetzt. Gehen in die Wirtschaftlichkeitsberechnung des Abbaus von Hartkohlen indirekt die Teufenerstreckung der Lagerstätte und die Flözmächtigkeit ein, werden zur Klassifizierung der nuklearen Energierohstoffe direkt die Gewinnungskosten genutzt. So werden bei Uran – ähnlich wie bei anderen Wertstoffen, die häufig in großen, aber armen Lagerstätten fein verteilt vorkommen (*disseminated ores*) – die Gewinnungskosten bei 40, 80 und 130 US\$/kgU zur Einstufung der Vorräte herangezogen. [16]

Die Klassifikation und die Mengenermittlung der Vorräte sind international also höchst unterschiedlich und hängen stark von den länder- und rohstoffspezifischen Gegebenheiten ab. Deshalb gab und gibt es auch zahlreiche internationale, nationale und branchenspezifische

Klassifikationssysteme [z.B. 17, 18, 19, 20]. Aus diesen Gründen hat eine UN-Kommission ein Klassifikationssystem entwickelt, das nach einheitlichen Kriterien weltweit die einzelnen Vorräte spezifizieren und bestimmen soll. Diese internationale Rahmenvorratsklassifikation (United Nations Framework Classification, UNFC) für feste fossile Brennstoffe und mineralische Rohstoffe basiert auf drei Kriterien:

- Wirtschaftlichkeit (*economy*) E, d.h. Grad der Bauwürdigkeit
- Machbarkeit (*feasibility*) F, d.h. Grad der bergtechnisch-bergwirtschaftlichen Untersuchung
- Geologie (*geology*) G, d.h. Grad der geologischen Untersuchung

Der Grad der Untersuchung, d.h. der Stand der Erkenntnis, wird hinsichtlich dieser Kriterien definiert und beziffert (Abb. 8). Durch die Kombination der Kriterien hinsichtlich ihrer Untersuchungsgrade ergeben sich dann Vorratsklassen. Sie werden also durch eine drei-reihige Ziffernfolge codiert und begrifflich festgelegt. Ähnliche Konzepte sind für entsprechende Vorratsklassen von flüssigen, gasförmigen und nuklearen Brennstoffen verfolgt und entwickelt worden. [21, 22, 23, 24]

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	E
latente Bauwürdigkeit	E 3
potenzielle Bauwürdigkeit	E 2
Bauwürdigkeit	E 1
Machbarkeitsuntersuchung	F
geologische Studie	F 3
Präfeasibility-Studie	F 2
Feasibility-Studie	F 1
geologische Untersuchung	G
Reconnaissance	G 4
Prospektion	G 3
Übersichtsexploration	G 2
Detailexploration	G 1
⇒ Vorratsklasse	E-F-G

Abb. 8: UNFC-Vorratsklassen

Diese Vorratsklassen könnten nun als Grundlage zur Abschätzung des Versorgungs- und Produktionspotenzials der fossilen und nuklearen Energieträger dienen, wenn dieses Konzept weltweit akzeptiert und angewendet würde. Jedoch ist zu beachten, dass es erhebliche Abweichungen bei der Bestimmung der Mengen in den einzelnen Vorratsklassen in Abhängigkeit von der technischen Entwicklung, dem Stand der geologischen Erkundung und der Bauwürdigkeit, aber auch der strategischen Überlegungen

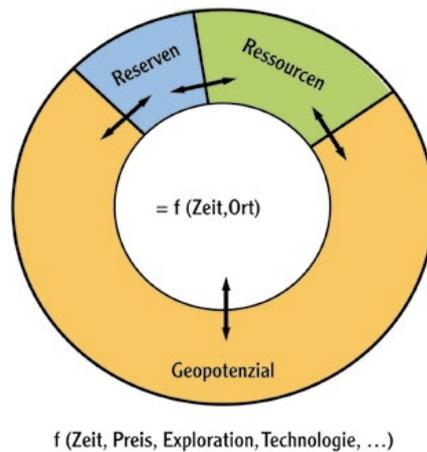


Abb. 9: Dynamisches System – Vorrattypen

einzelner Staaten gibt. Die Klassifikation der Vorräte ist also ein dynamisches Konzept und mithin zeit- und ortsabhängig (Abb. 9).

Sehr deutlich lässt sich die Zeitabhängigkeit dieses Konzepts anhand der Entwicklung der Reserven darstellen. Das Verhältnis von Reserven und jährlicher Förderung, auch statische zeitliche Reichweite R genannt, ist typisch für einen Rohstoff und bewegt sich trotz in der Regel stark angestiegener Förderung in einer bestimmten Bandbreite. [22] Für Öl variiert dieser Index seit Jahrzehnten zwischen 30 ± 10 Jahren, für Gas zwischen 50 ± 10 Jahren (Abb. 10). [14]

Die Forderung nach einer höheren Reichweite wäre allein volkswirtschaftlich nicht vertretbar; sie würde zu viel Kapital unnötig binden. Der Index ist also lediglich eine Momentaufnahme im dynamischen System der Vorräte und kann keine Aussagen über die tatsächliche Reichweite eines Rohstoffvorrats liefern.

Die beschriebenen Probleme verdeutlichen die Grenzen der Aussagegenauigkeit und der Ermittlung von Vorratsan-

gaben. Trotzdem ist es unerlässlich, die Vorräte an den einzelnen Energierohstoffen abzuschätzen, um eine Basis für politische, volks- und betriebswirtschaftliche sowie technische Entscheidungen zu gewinnen. Auf Grund der beschriebenen Schwierigkeiten kommt folglich nur ein pragmatischer Ansatz in Frage, der in bestimmten Zeitabständen und bei neuen Entwicklungen angepasst werden muss. [16, 25] Im Rahmen dieser Abhandlung erfolgt die Angabe der Reserven und Ressourcen deshalb auf der Grundlage z. Z. zugänglicher Zusammenstellungen von Daten zu den einzelnen Energierohstoffen. [25]

4.1 Vorräte fossiler Energieträger

Die fossilen Energieträger decken heute den mit Abstand größten Teil des weltweiten Energiebedarfs ab. Jedoch sind diese Energieträger quasi nicht erneuerbar, sofern z. B. von der natürlichen Biomasse, die ständig in den geologischen Prozess eingeführt wird, abgesehen wird (siehe Abb. 6). Somit sind diese Energieträger in ihrer Verfügbarkeit begrenzt und die Vorräte an ihnen in ihrer Reichweite limitiert. Für die absehbare Zukunft werden Kohle, Erdöl und Erdgas aber weiterhin ihre Bedeutung zur Versorgung der Menschheit mit Energie behalten. Die Frage nach der Reichweite ist also berechtigt. Unter Beachtung des Verfahrens der Erhebung der Daten (siehe Pkt. 4), der Auswertemethoden und der Interessenlagen einzelner Staaten und Unternehmen kann die Frage jedoch nicht einmal annähernd korrekt beantwortet werden.

Globale Vorratsdaten basieren trotz dieser Schwierigkeiten auf Erhebungen einzelner Organisationen und Institutionen, wie z. B. des World Energy Councils (WEC), des United States Geological Sur-

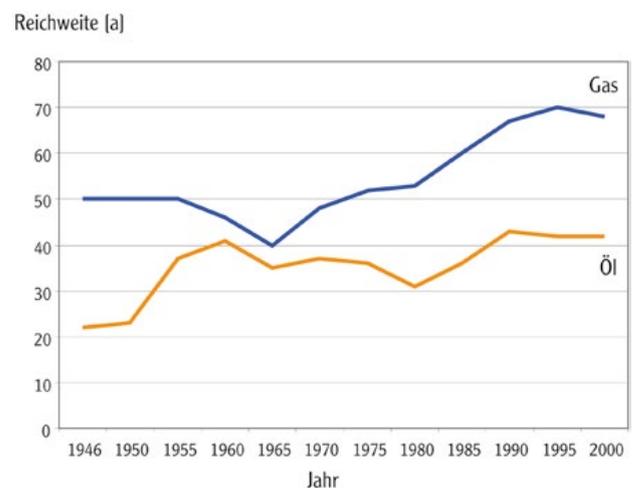


Abb. 10: Statische Reichweite R

veys (USGS) oder der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Die Vorratsausgaben werden nach Reserven und Ressourcen getrennt erhoben.

Bei den hier herangezogenen Zusammenstellungen [25, 26] werden bei den Kohlen Weichbraunkohlen und Hartkohlen (Hartbraunkohlen, Steinkohle, Anthrazit) unterschieden, wobei der Energieinhalt als Unterscheidungskriterium (Weichbraunkohlen: kleiner 16.500 kJ/kg, Hartkohlen: größer 16.500 kJ/kg) genutzt wird. Die Kohleklassifikation ist jedoch in den verschiedenen Staaten sehr unterschiedlich, so dass eine Zuordnung zu den Kohlearten nicht ohne Probleme überall erfolgen kann (z. B. bei subbituminösen Kohlen).

Bei Erdöl und Erdgas wird zusätzlich noch zwischen konventionellen und nicht-konventionellen Rohstoffen unterschieden. Konventionelles Erdöl ist fließend und weist eine Dichte kleiner als 1 g/cm³ auf. Dazu gehören Leichtöl, Schweröl und flüssige Kohlenwasserstoffe, die bei der Erdgasförderung anfallen, wie Kondensat, Flüssiggas (natural gas liquids, NGL). Nicht-konventionelles Erdöl umfasst Schwerstöl und in Ölschiefern und Ölsanden gebundenes Erdöl mit einer Dichte größer als 1 g/cm³ und einer hohen Viskosität.

Freiströmendes Erdgas, das ohne weitere technische Maßnahmen der Förderbohrung zuströmt, wird als konventionelles Gas bezeichnet. Dazu gehören Gas aus Erdgas- und Gaskondensatvorkommen sowie Erdölgas. Nicht-konventionelles Erdgas umfasst Gas aus dichten Gesteinen (*tight gas, shale gas*), Kohleflözgas (*coal bed methane, CBM*), Aquifergas und Gashydrat.

Gemessen am heutigen Verbrauch werden Vorräte an fossilen Brennstoffen für die nächsten Jahrhunderte ausreichend zur Verfügung stehen, wenn auch in regional unterschiedlichem Ausmaß (Abb. 11). [25, 26] Das Maximum der Jahresproduktion mit einer anschließend abflachenden Produktion wird wahrscheinlich zunächst für Erdöl erreicht. [14] Für konventionelles Erdöl wird dieses Maximum um das Jahr 2023 erwartet. [25] Dieses Fördermaximum kann ein Indiz für eine absehbare Verknappung von Rohöl sein. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass in der Regel weit weniger als 50% des Lagerstätteninhalts gewonnen und durch entsprechenden technischen Fortschritt die Ausbeute bislang bekannter Lagerstätten erhöht

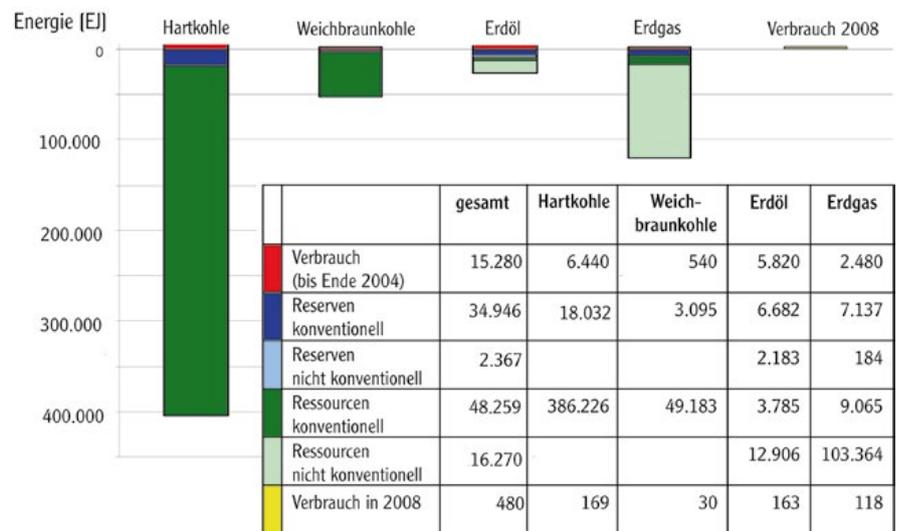
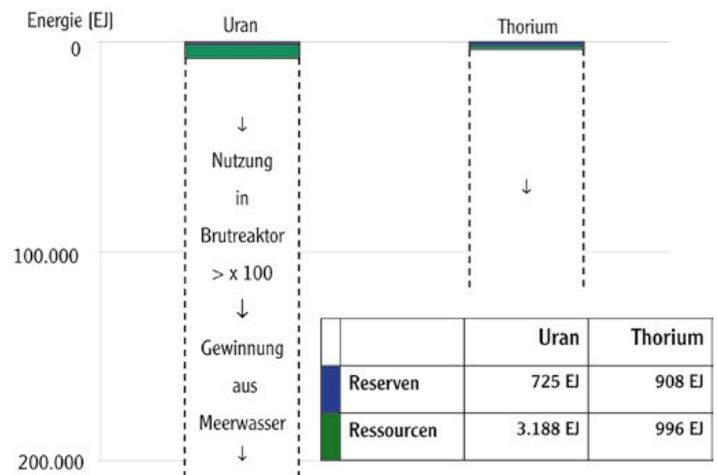


Abb. 11: Reserven und Ressourcen fossiler Energieträger (2008)

Abb. 12: Reserven und Ressourcen nuklearer Energieträger (2008)



werden kann. Die Prognosen für Gas und Kohle lassen eine – verglichen mit dem Öl – erheblich längere Reichweite erwarten. Insbesondere gilt dies für Erdgas. Allein das an Gashydrate gebundene Gas wird auf 1 bis 120 · 10¹⁵ m³ [25], einem Energiegehalt von ca. 38 bis 4.500 · 10³ EJ entsprechend, geschätzt.

4.2 Vorräte nuklearer Energieträger

Die nuklearen Energieträger, die nach heutigem Ermessen zukünftig einen Beitrag zur weltweiten Energieversorgung leisten werden, umfassen hauptsächlich Uran und Thorium. Beide Elemente sind lokal in unterschiedlicher Konzentration in der Erdkruste weit verbreitet, so dass eine Einteilung in die einzelnen Vorratsklassen häufig nach Maßgabe der Gewinnungskosten erfolgt. Steigen die Preise infolge erhöhter Nachfrage, steigen auch die Reserven und Ressourcen. Die Ressourcen beispielsweise an Uran können darüber hinaus weiter deutlich ausgeweitet werden, wenn die Aufbereitung von Kernbrennstäben und Kern-

waffen oder die Gewinnung aus Meerwasser einbezogen wird. Die Nutzung von nuklearen Energieträgern kann darüber hinaus durch den Einsatz von Brutreaktoren noch erheblich erweitert werden. [27]

Als Reserven werden die gesicherten Reserven (*reasonably assured resources, RAR*), d. h. das Uran in erkundeten Lagerstätten mit bekanntem Metallinhalt, mit Gewinnungskosten kleiner als 40 US\$/kgU bezeichnet. Gesicherte Reserven mit voraussichtlich höheren Gewinnungskosten sowie vermutete Reserven (*inferred resources, IR*), deren Gewinnungskosten jedoch geringer als 130 US\$/kgU sind, und unentdeckte Vorräte (*undiscovered resources*), deren Existenz auf Basis geologischer Erkenntnisse vermutet wird, werden als Ressourcen bezeichnet [21, 25]. Die Vorräte an nuklearen Energieträgern sind zwar begrenzt, aber aufgrund der technischen Perspektiven und der absehbaren Preissituation noch für viele Jahrhunderte ausreichend (Abb. 12). [25, 27]

5 Energieströme

Menschliches Leben ist auf der Erde nur innerhalb eines sehr engen Temperaturfensters möglich. Ohne die Energieflüsse externer und interner Energiequellen, die die Erdoberfläche mit Energie versorgen, und ohne die Umwandlung und Nutzung dieser Energieströme in Stoffströmen würden auf der Erde die Temperaturen des Weltalls herrschen. Die ein- und ausgehenden Energieströme stehen dabei in einem empfindlichen Gleichgewicht.

Die eingehenden Energieströme gehen hauptsächlich auf die Sonne (Strahlung), die Erde selbst (Wärme infolge radioaktiven Zerfalls und Restwärme aus der Zeit der Entstehung der Erde) sowie den Mond (wechselnde potenzielle Energie) zurück (Abb. 13). [28, 29, 30, 31]

Die größte Energiequelle ist mit Abstand die Sonne. Mit um Potenzen geringeren Strömen folgt die Erde als Energiequelle und in nochmals kleinerem Umfang der Mond. Die Energiebilanz gleicht sich durch kurz- und langwellige Strahlungsenergie aus, die in das Weltall emittiert wird.

Die auf die Erdoberfläche treffende Energie bewirkt und treibt zwei große Stoffströme. Der mächtigste Stoffkreislauf ist der des Wassers (Abb. 14). [32, 33] In den Wasserkreisläufen finden auch Änderungen der Aggregatzustände statt. Deutlich kleinere Kreisläufe durchläuft der Kohlenstoff (C) (Abb. 15). [29, 34] Auf Grund seiner Polyvalenz werden aus ihm zahlreiche organische und anorganische Verbindungen erzeugt, er ist das entscheidende Element bei der Photosynthese. Deshalb ist der Kohlenstoffkreislauf durch überlagerte chemische Reaktionen geprägt, wie durch die Oxidation bei der Verbrennung oder die Wandlung des Kohlendioxids in Glukose bei der Photosynthese.

Durch Interaktion der Energieströme, der Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe gibt es neben der direkten Einwirkung der primären Energielieferanten (Sonne, Erde, Mond) zahlreiche Energie- und Stoffaustauschvorgänge. So baut sich in der Atmosphäre z.B. ein großes Potenzial an kinetischer Energie in Form von Wind auf, das auch energetisch genutzt werden kann. Diese Energie- und Stoffströme ermöglichen somit nicht nur menschliches Leben auf der Erde, sondern sie dienen auch als Quellen regenerativer Energiearten. Neben den primären Energieströmen, die direkt genutzt

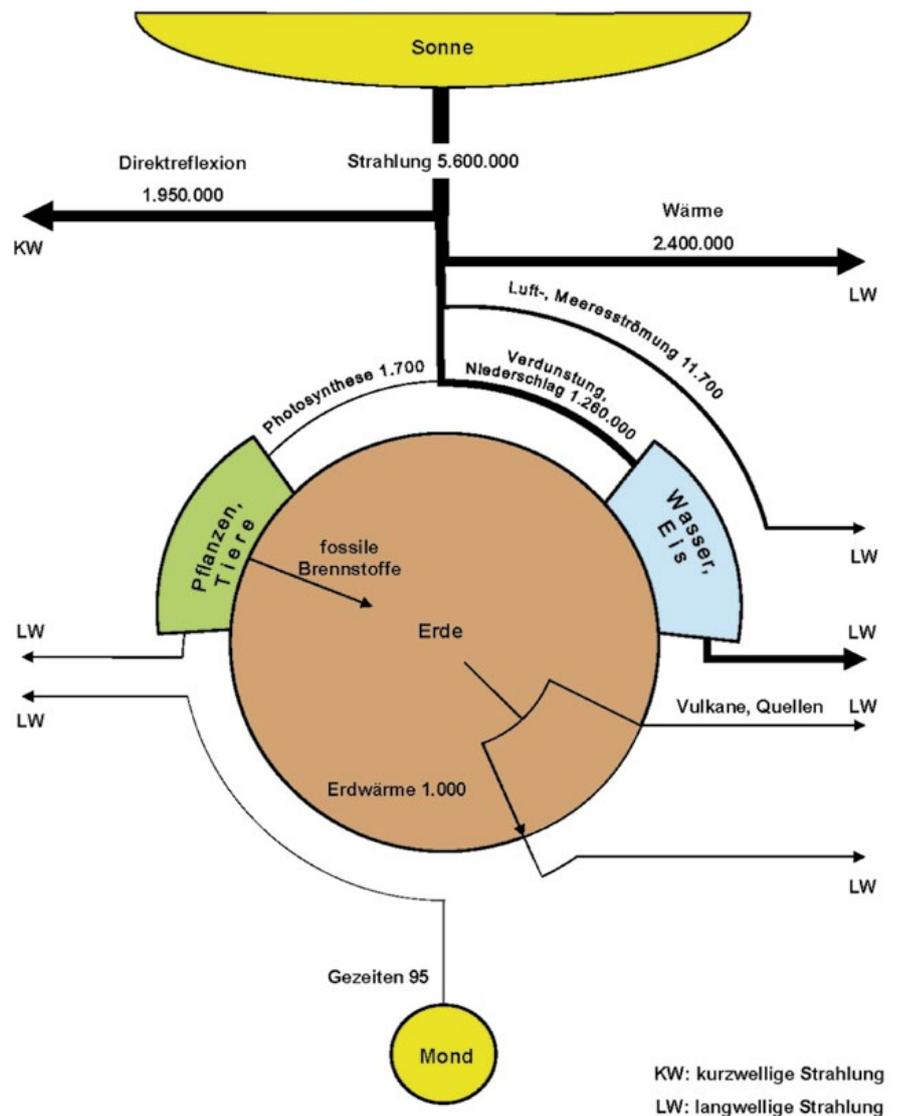


Abb. 13: Jährlicher Energiefluss (EJ/a)

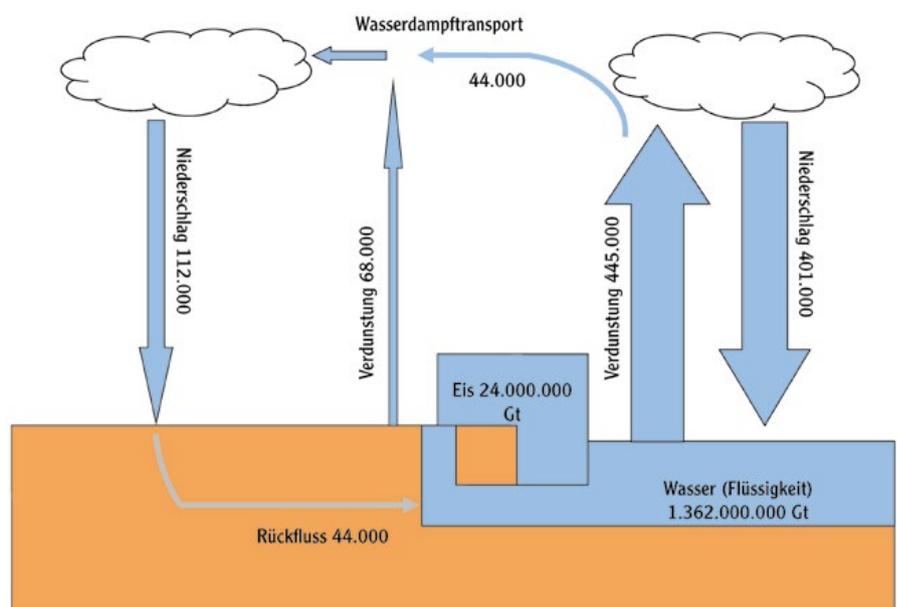


Abb. 14: Jährlicher Wasserkreislauf (Gt H₂O/a)

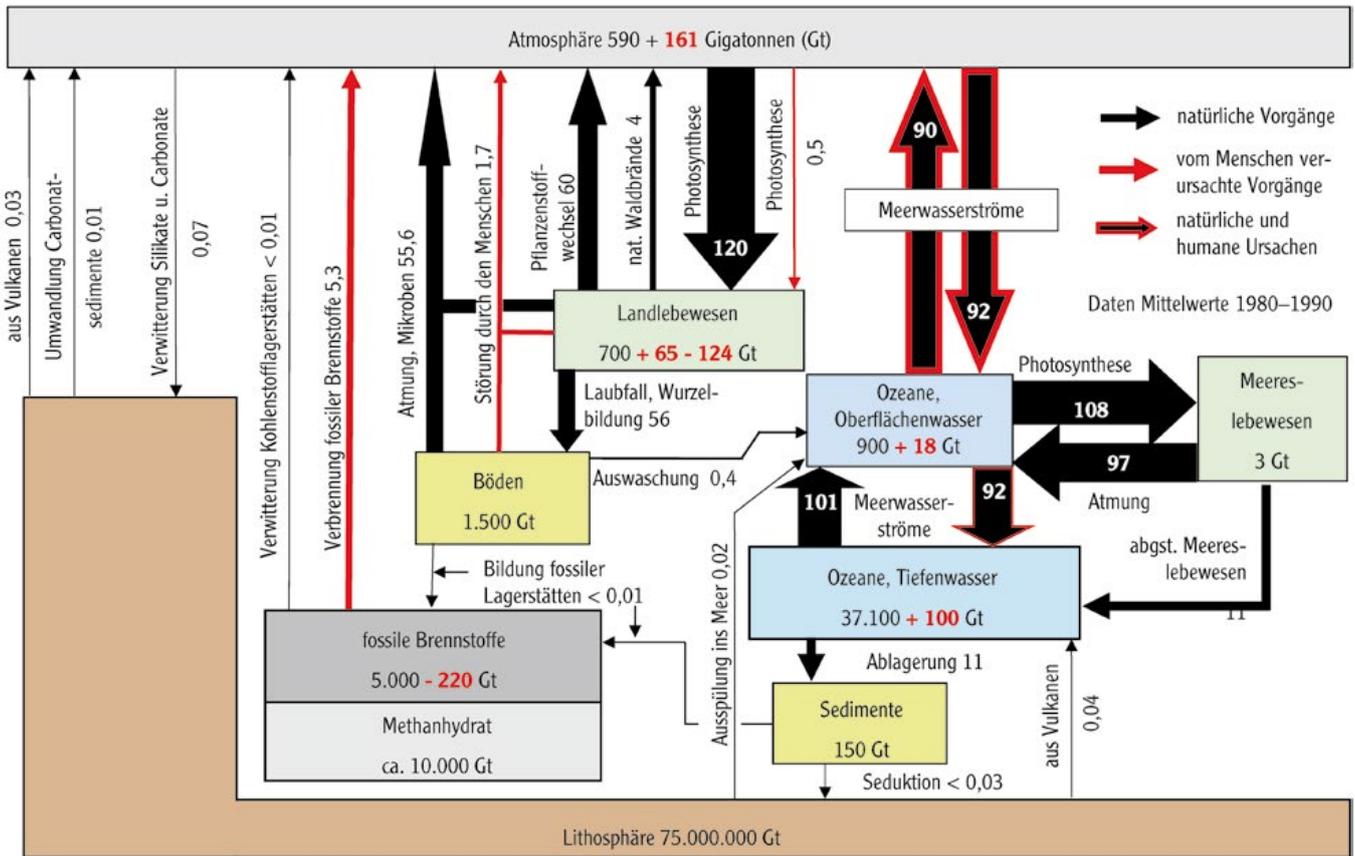


Abb. 15: Jährlicher Kohlenstoffkreislauf (Gt C/a)

werden können (z. B. Strahlungsenergie der Sonne), induzieren diese sekundäre Energieströme, die ebenfalls energetisch gewandelt und genutzt werden können (z. B. Strömungsenergie des Wassers).

5.1 Regenerative Energieträger

Die Energiequellen Sonne, Mond und Erde werden – bezogen auf die absehbare Menschheitsentwicklung – unendlich lange die Erdoberfläche mit Energie \dot{E}_{ip} versorgen (siehe Abb. 6). Dabei kann die Strahlungsenergie der Sonne entweder direkt oder indirekt in entsprechenden natürlichen Energiewandlungsprozessen C_n als chemische Energie in Form von Biomasse genutzt werden. Die Strahlungsenergie wird aber auch in Wärmeenergie oder durch z. T. komplexe Prozesse in kinetische Energie gewandelt. In der Natur machen sich diese Effekte in Form erwärmter Medien (Gesteine, Wasser oder Luft) bzw. als Luft- und Wasserströmungen bemerkbar. Luft- und Wasserströmungen werden darüber hinaus aber auch durch die Rotation der Erde initiiert (Abb. 16). Die örtlich wechselnde potenzielle Energie des Mondes verursacht den Gezeitenhub der Meere. Der Zerfall der in der Erde eingelagerten Isotope bzw. die noch bei der Entstehung

Energiequelle	Energieart	Energiewandlung (Natureffekte)	Energieträger
Sonne	E_{Str}	—	Strahlung
		$E_{Str} \rightarrow E_{chem}$ (Photosynthese)	Biomasse
		$E_{Str} \rightarrow E_{Wärme}$ (Absorption)	Gestein/Wasser/Luft
		$E_{Str} \rightarrow E_{Wärme} \rightarrow E_{kin}$ (Absorption) (Konvektion)	Wasser/Luft (Meeres-/Luftströmung)
		$E_{Str} \rightarrow E_{Wärme} \rightarrow E_{kin} \rightarrow E_R \rightarrow E_{kin}$ (Absorption) (Konvektion) (Reibung) (Strömung)	Wasser (Wellenbewegung)
		$E_{Str} \rightarrow E_{Wärme} \rightarrow E_{lat} \rightarrow E_{kin} \rightarrow E_{pot} \rightarrow E_{kin}$ (Absorption) (Phasenänderung) (Transport)	Wasser (Flussströmung)
Mond	E_{pot}	$E_{pot} \rightarrow E_{kin}$ (Gravitation)	Wasser (Gezeitenhub)
Erde	$E_{Bindung}$	$E_{Bindung} \rightarrow E_{Wärme}$ (Isotopenzerfall)	Gestein
	$E_{Wärme}$	$E_{Wärme} \rightarrow E_{Wärme}$ (Wärmeleitung)	Gestein
	E_{kin}	$E_{kin} \rightarrow E_R \rightarrow E_{kin}$ (Reibung) (Strömung)	Wasser/Luft (Meeres-/Luftströmung)

Abb. 16: Natürliche Energiewandlungsprozesse C_n

der Erde gespeicherte Wärme ermöglichen eine stetige Erwärmung der Gesteine. All diese in der Natur vorkommenden Energieformen können technisch unter Anwendung physikalischer und chemischer Effekte in Apparaten und Maschinen genutzt werden (Abb. 17). So können die schon in einem ersten Schritt

durch natürliche Energiewandlung entstandenen Energieträger in einem zweiten Schritt technisch in die Nutzenergien Wärme-, kinetische, elektrische oder chemische Energie gewandelt werden. Da die genannten Energiequellen nicht versiegen, können sich diese Energiemengen „regenerieren“.

Energieträger	Energieart	Apparat/Maschine	genutzter Effekt	technische Wandlung	technische Nutzenergie (Weiternutzung)
Strahlung	E_{Str}	Photozelle	Fotovoltaik	$E_{Str} \rightarrow E_{el}$	Strom
		Kollektor	Solarthermie	$E_{Str} \rightarrow E_{Wärme}$	Wärme (Strom)
		chem. Reaktor	Fotolyse	$E_{Str} \rightarrow E_{chem}$	Brennstoff
Biomasse	E_{chem}	Brennraum	Verbrennung	$E_{chem} \rightarrow E_{Wärme}$	Wärme (Strom)
		chem. Reaktor	Konversion	$E_{chem} \rightarrow E_{chem}$	Brennstoff
		Wärmepumpe	Kreisprozess	$E_{Wärme} \rightarrow E_{Wärme}$	Wärme
Gestein/Wasser/Luft	$E_{Wärme}$	Verdampfer/Turbine/Generator	Strömung	$E_{lat} \rightarrow E_{kin}$	Kraft (Strom)
		Turbine/Generator	Strömung/el.-mag. Effekt	$E_{kin} \rightarrow E_{el}$	Strom

Abb. 17: Technische Energiewandlungsprozesse $C_t (\dot{E}_{js2} \rightarrow \dot{E}_{kr})$

5.2 Angebot und Nutzbarkeit erneuerbarer Energien

Die Entwicklung der Messtechnik ermöglicht inzwischen eine sehr gute Abschätzung, in welchem Umfang die erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen (Abb. 18). [9, 25, 35, 36] Die Menge der nutzbaren erneuerbaren Energien basiert allerdings auf der knappen Ressource Fläche. Deshalb besteht in vielen Fällen ein Konflikt bei der Nutzung dieser Flächen. Besonders deutlich wird dies in Auseinandersetzung zur Produktion von Biomasse, die sowohl zur Ernährung der Menschheit benötigt, als auch zur energetischen Nutzung gebraucht wird. Unter Abwägung solcher Konflikte und technischer Möglichkeiten könnte der heutige Energiebedarf der Menschheit mit regenerativen Energien zu ca. 350 % abgedeckt werden. Auch der in den nächsten Jahren steigende Bedarf kann noch befriedigt werden. Jedoch stößt auch die Versorgung der Menschheit mit regenerativen Energien bei weiterhin ungebremstem Wachstum der Ener-

gienutzung schon in naher Zukunft an Grenzen. Geht man beispielsweise davon aus, dass die Grenze der Nutzbarkeit von regenerativer Energie bei ca. 2.000 EJ/a liegt und die Menschen ein Wohlstandsniveau und damit eine Energienutzung pro Kopf weltweit wie in Deutschland erreichen – was aus moralischen und politischen Gründen anzustreben ist –, so könnten ca. 10 Milliarden Menschen mit regenerativer Energie versorgt werden.

6 Schlussfolgerungen

Eine zukünftige Energieversorgung muss sich nun u. a. an folgenden Aspekten ausrichten:

6.1 Technisch-naturwissenschaftliche Aspekte

6.1.1 Technische Machbarkeit

Die Energieversorgung der Welt basiert heute überwiegend auf der Nutzung von fossilen Energieträgern (siehe Abb. 2). Erneuerbare Energieträger leisten noch nicht einmal einen Beitrag von 15 %. Die angestrebte weitestgehende

Versorgung der Menschheit mit erneuerbarer Energie wird technisch möglich sein, hat aber aufgrund der niedrigen Energiedichte der regenerativen Energieträger sowie der zeitlichen Asymmetrie zwischen Energienachfrage und technisch möglicher Energieversorgung – und damit einer notwendigen, bis heute nicht gelösten temporären Energiespeicherung – zur Folge, dass der technische Aufwand erheblich steigen wird. Ein immenser Einsatz von Rohstoffen, Energie und Land ist erforderlich, um die Energiewandlungsanlagen, Netze, Speicher, Mess- und Regelungstechnik aufzubauen. Die Umsetzung wird mit zahlreichen dezentralen Energiewandlungsanlagen erfolgen, aber auch mit Großanlagen, deren Dimensionen die Abmessungen der heutigen Kraftwerke deutlich übertreffen werden. Eine weitere „Technisierung“ der Gesellschaft und der Landschaft wird somit kommen.

Die gewünschte Ausweitung der Nutzung der regenerativen Energien wird jedoch in Zukunft nur auf der Basis massiver Investitionen in Forschung und Entwicklung gelingen. Dabei wird es notwendig sein, die Entwicklung bei allen erneuerbaren Energien und bei den hierfür notwendigen Zusatztechnologien voranzutreiben. Betrachtet man allerdings den Stand der Technik, so steht beispielsweise die Entwicklung der Energiespeicher oder der Tiefengeothermie noch am Anfang.

Auch wenn entsprechende Technologien eines Tages entwickelt sein werden, ist nicht sicher, ob es nicht bei ihrem großflächigen und/oder großtechnischen Einsatz zu bisher unbekanntem, unerwünschten Effekten kommt, wie z. B. zur Auslösung von Erdbeben durch Geothermievorhaben in gestörten, mechanisch vorgespannten geologischen Strukturen, oder zu klimatischen Auswirkungen aufgrund des Entzugs kinetischer Windenergie aus der Atmosphäre durch Windkraftanlagen oder zu technischem Versagen mit Folgen für Menschen und Umwelt.

6.1.2 Grenzen

Die Nutzung von Energie stößt an natürliche und technische Grenzen. Unter Beachtung der Begrenztheit der Vorräte an fossilen und nuklearen Energieträgern – wenn auch noch für viele Jahrhunderte ausreichend – und des Einsatzes von regenerativen Energieträgern – wenn auch bei weitem noch nicht

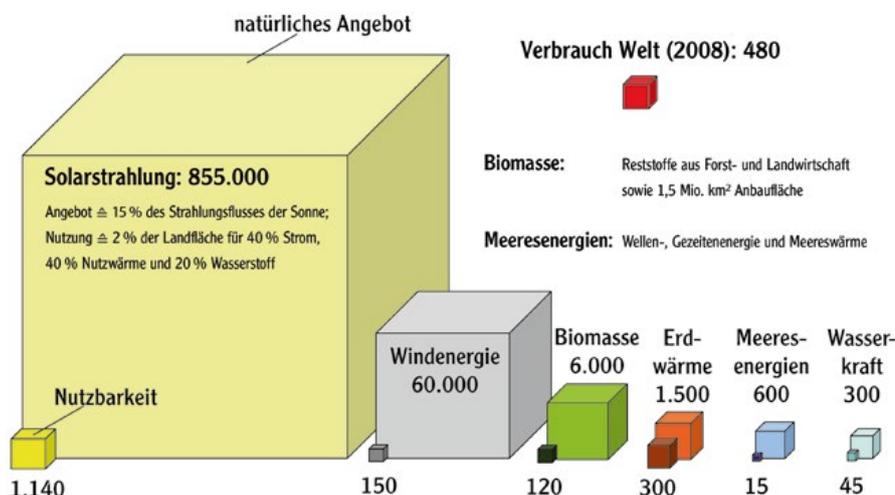


Abb. 18: Natürliches Angebot und Nutzbarkeit erneuerbarer Energien (Welt) (EJ/a)

ausgeschöpft – wird die Menschheit deshalb ihren Energiebedarf limitieren müssen. Alle Energieträger stehen nicht unbegrenzt zur Verfügung. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Grenze bei 1.000, 2.000 EJ/a oder höher liegt. Die Grenze der Beanspruchbarkeit der Erde wird auf alle Fälle erreicht werden.

Der Zeitpunkt, wann dies der Fall sein wird, kann erheblich hinausgezögert werden, wenn durch technischen Fortschritt und verbesserte betriebs- sowie volkswirtschaftliche Organisation der Anteil der sinnvoll eingesetzten Nutzenergie am Primärenergieinput von heute unter 20 % deutlich gesteigert wird.

6.2 Wirtschaftlich-gesellschaftliche Aspekte

Die investiven Ausgaben der Wirtschaft, aber auch die für Forschung und Entwicklung, richten sich hauptsächlich nach den kurz- bis mittelfristigen Vermarktungschancen von Prozessen und Produkten. Unternehmen müssen die Kosten in überschaubaren Zeiträumen erwirtschaften und Geld verdienen können, um am Markt zu bestehen.

Staaten könnten sich zusätzliche Ausgaben für langfristige Entwicklungen leisten. Die Verteilungskämpfe um die immer zu knappen Haushaltsmittel und der Legitimationsdruck, zum nächsten Wahltermin Erfolge vorweisen zu müssen, setzen in den politischen Abwägungsprozessen in der Regel dort die Prioritäten, wo in der „Öffentlichkeit“ die größte Not wahrgenommen wird und die „öffentliche Meinung“ die weitestreichende Unterstützung bewirkt. Deutlich erkennbar ist dieser Effekt an den staatlichen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung in den vergangenen 40 Jahren (Abb. 19). [37] Die Energiethemen gewidmeten Ausgaben erreichten in der Zeit unmittelbar in und nach der Ölkrise relativ und absolut einen Höhepunkt und sanken dann wieder drastisch, als wieder ausreichend und günstig Energie zur Verfügung stand (1980: ca. 12 % Anteil der Energiethemen an den gesamten F&E-Ausgaben in den Mitgliedsländern der International Energy Agency, 2005: ca. 4%). [37] Selbst die Aufwendungen für regenerative Energieträger erreichen erst heute wieder das Niveau von vor 30 Jahren. Die Kosten und Amortisationszeiten für Forschung und Entwicklung sowie die Investitionen im Energiebereich sind meistens außerordentlich hoch.

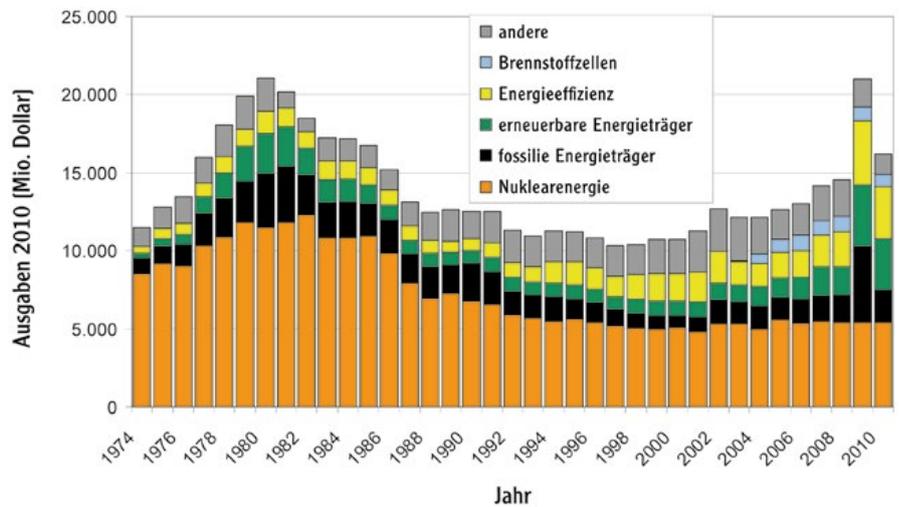


Abb. 19: Weltweite Ausgaben für Energieforschung und -entwicklung sowie Prototypenbau in den Mitgliedsstaaten der International Energy Agency (ohne Polen, Slowakei und Tschechien, Preisbasis und Umrechnungskurse 2010)

Stabile gesellschaftliche Verhältnisse sind deshalb Voraussetzung für eine erfolgreiche Energiepolitik. Dabei ist es gleichgültig, ob private oder staatliche Unternehmen diese Aufwendungen tätigen. Sie brauchen langfristige Planungs- und Rechtssicherheit. Ohne gesellschaftlichen Konsens in den Grundzügen der Energiepolitik ist dies nicht möglich.

6.3 Ausblick

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass die Reserven und Ressourcen an fossilen und nuklearen Energieträgern, trotz prinzipieller Begrenztheit, noch mehrere Jahrhunderte – auch bei steigender Inanspruchnahme durch die Menschheit – reichen werden. Die regenerativen Energieträger sind an Energieströme gebunden und somit in ihrer Verfügbarkeit limitiert. Sie sind aber in der Lage, auch bei erhöhtem Energiebedarf die Energieversorgung zu ermöglichen. Jedoch sind die Auswirkungen größtenteils noch unbekannt. Die Grenzen des Wachstums des Energiegebrauchs der Menschheit sind allerdings absehbar. Allein das Wachstum des Energieverbrauchs zu reduzieren und dann eine Grenze einzuhalten, wird gewaltige Anstrengungen angesichts des ungebrochenen Bevölkerungswachstums und des Strebens nach steigendem Wohlstand erfordern.

Die weitere Umstellung auf die Nutzung regenerativer Energie wird zu einer deutlichen Anhebung der Kosten für die Bürger und den Staat führen. Deren Begleichung wird daher nur durch eine andere Priorisierung der Ausgaben bzw. auf Kosten anderer Politikfelder möglich

sein. Die direkte Beeinträchtigung des persönlichen Umfeldes von erheblich mehr Menschen wird spürbar steigen, da ein Großteil der Bevölkerung direkt von den Nebenwirkungen der Wandlung regenerativer Energie tangiert sein wird. Die heutigen Vorbehalte gegen eine kritische Bewertung und eine sachliche Abwägung von Vor- und Nachteilen der Nutzung einzelner Energieträger werden in der öffentlichen Auseinandersetzung abgebaut werden müssen, da die Mehrheit der Bürger direkt betroffen sein wird. Die Menschheit sollte sich deshalb keinen Illusionen hingeben, dass durch die Umstellung der Energieversorgung von fossilen und nuklearen Energieträgern auf regenerative das Energieproblem kurzfristig lösbar sein wird. Die Versorgungsfrage wird auch zukünftig eines der großen ungelösten Probleme der Menschheit bleiben. Die Frage der Nachhaltigkeit einer zukünftigen Energieversorgung ist offen. Wir werden es uns wahrscheinlich auch in Zukunft nicht leisten können, nicht alle Energieträger-Nutzungstechniken weiterzuentwickeln.

Literatur

- 1 Carlowitz, H. C. von: Sylvicultura oeconomica oder haußwirtschafftliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht. Verlag J. F. Braun, Leipzig, 1713.
- 2 Blech, J.; Evers, M.; Schmundt, H. und Schwägerl, C.: Kur für Erdöljunkies. in Der Spiegel 33, 2008.
- 3 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien. Berlin, 2009.
- 4 Tenbrock, C.: Die Welt der Energie. in Die ZEIT, 23.10.2008.

- 5 International Energy Agency: Key World Statistics. Paris, 2008.
- 6 International Monetary Fund: World Economic Outlook Database. Washington, 2007.
- 7 US Census Bureau: Historical Estimates of World Population. Washington, 2010.
- 8 US Census Bureau: Total Midyear Population of the World. Washington, 2010.
- 9 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien. Berlin, 2006.
- 10 European Renewable Energy Council and Greenpeace International: energy[r]evolution. Brüssel, Amsterdam, 2008.
- 11 Henniche, P. und Bodach, S.: EnergieREVOLUTION. oekom verlag, München, 2010.
- 12 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit, Hauptgutachten 2003. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- 13 Gruss, P. und Schüth, F. (ed.): Die Zukunft der Energie. Verlag C. H. Beck, München, 2008.
- 14 Wellmer, F.-W.: Reserves, Resources, Geopotential. Geopommerania. Szczecin, 25. September 2007.
- 15 Schmidt, S.; Rehder, S. und Cramer, B.: Quo vadis Kohle? Commodity Top News Nr. 32, BGR, Hannover, 2009.
- 16 World Energy Council: Survey of Energy Resources. London, 2007.
- 17 International Atomic Energy Agency: Uranium Resources, Production and Demand. Paris, 1986.
- 18 Österreichisches Normungsinstitut: Klassifikation von Vorkommen fester mineralischer Rohstoffe, ÖNORM G 1050. Wien, 1989.
- 19 Ruhrkohle AG: Richtlinien für die Kohlenvorratsermittlung. Essen, 1982.
- 20 U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey: Principles of a resource/reserve classification for minerals. Geological Survey Circular 831, Arlington, 1980.
- 21 Nuclear Energy Agency: URANIUM 2005: Resources, Production and Demand. 2007.
- 22 Slaby, D. und Wilke, L.: Bergwirtschaftslehre Teil 1. Verlag der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2005.
- 23 United Nations: United Nations Framework Classification (UNFC) applied to Petroleum Resources. 2003.
- 24 United Nations Economic Commission for Europe: United Nations Framework Classification for Energy and Mineral Resources. 2004.
- 25 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Energierohstoffe 2009: Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. Hannover, 2009.
- 26 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen, Short Study 2009. Hannover, 2009.
- 27 Andrews, J. und Jelley, N.: energy science. Oxford University Press, New York, 2007.
- 28 Bischoff, G. und Gocht, W.: Das Energie Handbuch. Verlag F. Vieweg und Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1978.
- 29 Heilmeier, H.: Der globale CO₂-Kreislauf aus ökologischer Sicht. in Zeitschrift für Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2007.
- 30 Hubbert, M. K.: The energy resources of the earth. in Scientific American, vol. 225, Sept. 1971.
- 31 Wengenmayr, R.: Wärme aus der Erde. in Erneuerbare Energie, Bührke, T. und Wengenmayr, R. (Hrsg.). Wiley-VCHVerlag, Weinheim, 2008.
- 32 Geick, P. H.: Water Resources. in Schneider, S. H. (Hrsg) Encyclopedia of Climate and Weather, vol. 2, Oxford University Press, New York, 1996.
- 33 Quatschnig, V.: Erneuerbare Energien und Klimaschutz. C. Hauser Verlag, München, 2008.
- 34 von Rauchhaupt, W.: Und ewig kreist der Kohlenstoff. in Frankfurter Allgemeiner Sonntagszeitung, 02.10.2005.
- 35 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger. Stuttgart, 2000.
- 36 World Atlas and Industry Guide 1998-1999. International Journal on Hydropower and Dams. Sutton, 1998.
- 37 International Energy Agency: Energy Technology RD&D Budgets. Paris, 2011.

Risikomanagement bei Unternehmen der Energieversorgungsbranche

Identifizierung möglicher Risikofelder

Stephan Rohleder¹, Tobias Nell¹

Einleitung

Die Unternehmen der Energieversorgungsbranche (EVU) stehen einer Vielzahl von Einflussgrößen gegenüber. Neben internen sind hierbei auch extern beeinflusste Faktoren und ihre Auswirkungen auf die EVU von Bedeutung. [1] Das zunehmende Umweltbewusstsein der Gesellschaft, die Verknappung von Ressourcen, erhöhte Anforderungen an die Versorgungssicherheit, Technologiesprünge sowie die restriktivere umweltpolitische und regulatorische Gesetzgebung stellen hierbei eine Vielzahl von Risikofeldern für EVU dar. [2] Um das Erreichen der gesetzten Ziele und den

Fortbestand der Unternehmen dennoch zu gewährleisten, bedarf es einer frühzeitigen Berücksichtigung dieser Risiken im Controlling. Hierfür ist es erforderlich, dass relevante Einflussgrößen im Rahmen eines Risikomanagements identifiziert und bewertet werden. Vor diesem Hintergrund gibt der nachfolgende Beitrag einen kurzen Überblick über ausgewählte Risikofelder, denen EVU ausgesetzt sind.

Begriff des Risikos und des Risikomanagements

Unter Risiko wird üblicherweise die Gefahr des Erleidens von Verlusten verstanden, [3] wobei der Begriff des Verlusts nicht zwangsläufig das Erreichen eines negativen Ergebnisses bedeutet, sondern sich vielmehr als die Gefahr des Nichterreichens von vorher definierten Zielen versteht. Das Spektrum der Ein-

zelrisiken wird als Risikoprofil bezeichnet. Risiken resultieren dabei sowohl aus internen Gegebenheiten als auch aus den Spezifika des Umfelds der EVU und können nach verschiedenen Aspekten, u. a. den Funktionsbereichen eines Unternehmens und den zugrundeliegenden Ursachen, eingeteilt werden. So lassen sich funktionsbezogen Beschaffungs-, Produktions-, Absatz-, Finanzierungs- oder Personalrisiken unterscheiden. Ursachenbezogen sind u. a. Regulierungs-, Technologie-, System-/Prozess-, Wettbewerbs- und Umweltrisiken zu nennen (Abb. 1).

Als Risikomanagement im weiteren Sinne wird die Summe aller Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Begrenzung der Wirkungen von Verlustgefahren bezeichnet. Das Risikomanagement hat dabei das Ziel, risikopolitische Einzelmaßnahmen unter Berücksichtigung bestehender Interdependenzen optimal,

1 Dipl.-Wi.-Ing. Stephan Rohleder, Dipl.-Wi.-Ing. Tobias Nell, TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, insbes. Internationale Ressourcenwirtschaft, Professur für ABWL, insbes. Rechnungswesen und Controlling, Prof. Dr. Silvia Rogler.

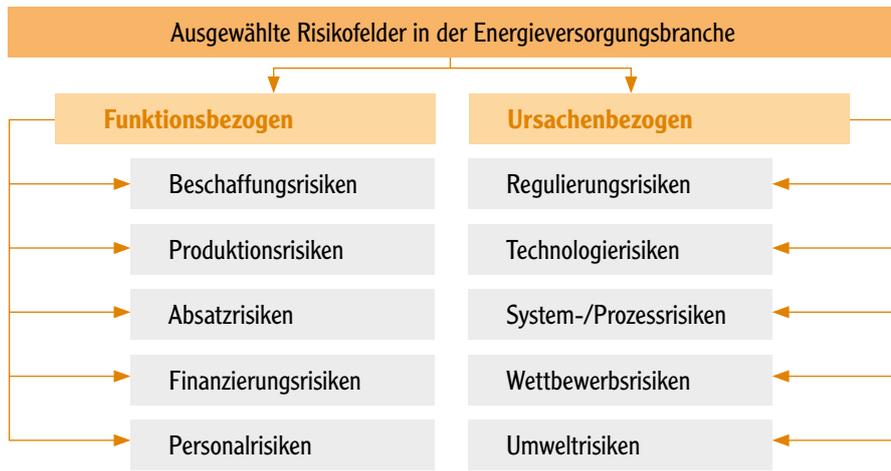


Abb. 1: Ausgewählte Risikofelder in Unternehmen der Energieversorgungsbranche

das heißt im Einklang mit den Unternehmenszielen, zu kombinieren und hierüber auch Einfluss auf die Unternehmensstrategie zu nehmen. [4] Geeignete Maßnahmen sollten folglich sowohl effektiv (wirksam) als auch größtmöglich effizient bezüglich des Einsatzes von Ressourcen (Rohstoffe, Personal und Finanzmittel) sein. Aufgabe des Risikomanagements ist daher zunächst die Identifizierung möglicher Einzelrisiken.

Identifizierung von Risikofeldern

Zur Risikoidentifizierung werden in EVU in der Praxis häufig sogenannte Kritikalitätsindizes verwendet. Zur Ermittlung dieser werden aggregierte Informationen, beispielsweise über potenzielle Preis- oder Verfügbarkeitsrisiken im Rahmen der Rohstoffversorgung, zusammengestellt, gewichtet und ein Indexwert ermittelt, wobei eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren Berücksichtigung findet, beispielsweise Rohstoffproduktions- bzw. Förderkosten, geostrategische Risiken, Marktsituation, Interdependenzen oder politisch-regulatorisch-soziale Faktoren. [5] Damit ist das Risikomanagement von EVU in seinem Ansatz zwingend auch interdisziplinär.

Denn die Informationsbereitstellung erfordert eine Einbindung aller Unternehmensbereiche und Wissenschaftsdisziplinen (Natur-, Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften). Die Risiken sind dabei allen Wertschöpfungsstufen der EVU immanent – von der Erkundung/Gewinnung der Energieträger über die Umwandlung und Übertragung bis hin zum Absatz der Nutzenergie – inklusive notwendiger Umwelteingriffe sowie des Zwischenhandels mit Rohstoffen, Energie oder Verschmutzungsrechten (Abb. 2). Zur Verdeutlichung der Risikolage werden im Folgenden die Beschaffungs-, Absatz-, Finanzierungs-, Regulierungs-, Technologie- und Umweltrisiken von EVU dargestellt.

Beschaffungsrisiken ergeben sich – abhängig von der Wertschöpfungsstufe des EVU – aus zeitlich schwankenden Preis-Angebots-Strukturen bei Energieträgern, Verschmutzungsrechten und Nutzenergie. Im Beispiel eines Kohlekraftwerksbetreibers (Umwandlung) besteht die Herausforderung darin, die für die Verstromung erforderliche Menge an Kohle und CO₂-Zertifikaten zu einem angemessenen Preis bereitzustellen. In der Praxis wird dabei regelmäßig

auf Termingeschäfte zur frühzeitigen Preis- und Mengenfixierung zurückgegriffen. [6] Diese Überlegungen gelten in analoger Weise für Absatzrisiken, die sich auf Preis-Nachfrage-Strukturen der entsprechenden Handelsobjekte (Commodities) beziehen. [7] Eine technisch bedingte Besonderheit von EVU, insbesondere von Kraftwerks- und Netzbetreibern (Energieumwandlung und -übertragung) ist die hohe und langfristige Kapitalbindung. [8] Hieraus ergeben sich Finanzierungsrisiken, die u. a. die Gefahr von nachteiligen Zinsänderungen oder einer zumindest kurzfristig fehlenden Liquidierbarkeit der entsprechenden Vermögensgegenstände umfassen. Darüber hinaus sind EVU vielfältigen Einflussnahmen durch die Politik ausgesetzt. Im Hinblick auf die besondere gesellschaftliche Bedeutung der Energieversorgung und die im Bereich der Übertragung vorherrschenden natürlichen Monopole sind EVU seit längerer Zeit Gegenstand einer intensiven Regulierung. Besonders die häufigen energiepolitischen Kursänderungen der letzten Jahre – als Beispiel sei hier die Energiewende im Gefolge der Atomkatastrophe im japanischen Fukushima genannt – setzen die Unternehmen vielfältigen Regulierungsrisiken aus. [9]

Neben dem Rückzug Deutschlands aus der Atomkraft kann in diesem Zusammenhang die sogenannte Anreizregulierung angeführt werden, mit der die Netzentgelte der Netzbetreiber (Übertragung) in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren, wie beispielsweise einer vorgegebenen kostenbezogenen Effizienzsteigerung, festgelegt werden. Aufgrund von politischen Einflüssen seitens des Regulierers ist diese Festlegung für die EVU jedoch risikobehaftet. [10] Auch die Versuche der EU-Kommission, CO₂-Emissionen durch eine reduzierte Ausgabe von CO₂-Zertifikaten und eine hiermit verbundene Preissteigerung bei diesen Zertifikaten zu verringern, stellen aus Sicht der EVU Regulierungsrisiken dar. [11] Im Zuge der Energiewende wird darüber hinaus u. a. die Bereitstellung von Elektrizität aus erneuerbaren Energieträgern forciert. Hierfür sind teilweise neue Technologien erforderlich, deren Einsatz noch nicht langjährig erprobt und damit fehler- und risikobehaftet ist. Die so aufkommenden Technologierisiken bestehen beispielsweise derzeit bei der Netzanbindung von Offshore-Windparks. [12] Nicht zu vernach-



Abb. 2: Wertschöpfungsstufen in Unternehmen der Energieversorgungsbranche

lässigen sind in diesem Zusammenhang auch die vielfältigen Eingriffe von EVU in die Natur durch die zumeist großtechnischen Prozesse, die nachteilige Wirkungen auf die Umwelt im Allgemeinen und rückwirkend, beispielsweise in Form von Strafzahlungen, auch auf die EVU haben können (Umweltrisiken). So musste beispielhaft die britische BP PLC (Erkundung/Gewinnung) aufgrund der Ölkatastrophe im Golf von Mexiko eine Strafzahlung in Höhe von mehreren Milliarden Euro leisten. [13] Dieses Beispiel zeigt, mit welchen Konsequenzen ein unzureichendes Management von Risiken, hier der Umweltrisiken, verbunden sein kann.

Die identifizierten Risiken sind im nächsten Schritt in den Kontext des Gesamtunternehmens zu setzen und auf mögliche Abhängigkeiten zu prüfen. Dieser umfasst eine Bewertung möglicher Maßnahmen unter Berücksichtigung von Interdependenzen und schlussendlich die Umsetzung geeigneter Maßnahmen sowie die Kontrolle ihrer Wirksamkeit. Dieser idealisierte Ablauf des Risikomanagements wiederholt sich als permanenter Kreislauf, wobei Änderungen der Aktivitäten des Unternehmens und des

Umfelds stets einzubeziehen sind. Damit erfüllt das Risikomanagement die klassischen Controllingaufgaben der Planung, Steuerung und Kontrolle.

Fazit

Das Risikomanagement von EVU ist zu einem bedeutenden Wettbewerbsfaktor avanciert. Die Vielfalt und die Häufigkeit der Änderungen von einzubeziehenden Parametern stellen hierbei erhöhte Anforderungen an das Controlling. Nur wenn Informationen bereichsübergreifend und interdisziplinär zusammengestellt werden, können mögliche Risiken zeitnah identifiziert und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Da auch in Zukunft das Umfeld der EVU erheblichen Änderungen unterliegen wird, wird auch das Risikomanagement eine weiterhin bedeutende Rolle im Controlling der EVU spielen.

Quellen

- 1 Vgl. Schenck, „Energiebranche im Wandel“ – Paradigmenwechsel aus der Sicht eines Finanzvorstands, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 12/2012, S. 868–872, S. 868.
- 2 Vgl. Neuhaus, Öko-Controlling – Umweltorientierte Unternehmensführung und ökologische Risikoversorge, in: Zeitschrift für Controlling

und Management 4/2008, S. 246–250, S. 246; Keil/Pierburg/Habermann, Controlling bei Bosch Solar Energy im Wandel, in: Controlling 4–5/2011, S. 222–229, S. 223.

- 3 Vgl. Rogler, Risikomanagement im Industriebetrieb, Wiesbaden 2002, S. 5.
- 4 Vgl. Rogler, Risikomanagement im Industriebetrieb, Wiesbaden 2002, S. 19 ff.
- 5 Vgl. Fridgen/König/Mette/Rathgeber, Die Absicherung von Rohstoffrisiken – Eine Disziplinen übergreifende Herausforderung für Unternehmen, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 3/2012, S. 167–190, S. 171 ff.
- 6 Vgl. Burger/Pedell, Risikocontrolling in der Energiewirtschaft, in: Controlling 3/2011, S. 196–198, S. 197.
- 7 Vgl. RWE, Geschäftsbericht 2012, S. 90 f.
- 8 Vgl. Ufer/Hoffjan, Controlling bei der RWE Energy AG, in: Controlling 7/2008, S. 389–392, S. 392.
- 9 Vgl. RWE, Geschäftsbericht 2012, S. 92.
- 10 Vgl. Pedell/Schwiehel, Auswirkungen regulatorischer Vorgaben auf Investitionsplanung und -steuerung, in: Controlling 11/2008, S. 585–591, S. 588.
- 11 Vgl. o. V., Nein zur Verknappung der Emissionszertifikate, <http://www.tagesschau.de/wirtschaft/emissionshandel146.html>, abgerufen am: 04.07.2013.
- 12 Vgl. Höpner, Netzanbindung der Windparks in der Nordsee verzögert sich, in: Handelsblatt 42/2013, S. 21.
- 13 Vgl. Slodczyk, BP zahlt Rekordstrafe für Ölpest, in: Handelsblatt 223/2012, S. 18.

Die Auswirkungen einer Rohstoffpreisbaisse auf den Firmenwert von Bergbauunternehmen

Eine Analyse ausgewählter Geschäftsberichte

Sandro Veit Straub¹, Martin Tettenborn¹, Silvia Rogler¹

Problemstellung

Seit dem Jahr 2011, in welchem die Preise für viele Rohstoffe wie Gold, Silber, Kupfer und Eisenerz historische Höchststände erreichten, befinden sich die Rohstoffpreise in einem Baissetrend. Gold verlor seit dem Höchststand 2011 23 %, Silber 50 %, Kupfer 32 % und Eisenerz 25 %. [1] Rohstoffpreise sind zwar normalerweise von einer volatilen Entwicklung geprägt; dies bedeutet aber nicht, dass es Bergbauunternehmen nicht vor Probleme stellt. Nicht nur, dass viele Unternehmen infolge der stark gefallen Preise im Jahr 2012 einen

Rückgang des Jahresergebnisses von im Schnitt 54 % verkraften mussten. Gleichzeitig ist zu befürchten, dass bei einem weiteren Anhalten des Baissetrends empfindliche Wertminderungen bei erworbenen Firmenwerten im Zusammenhang mit Übernahmen hingenommen werden müssen. Einen Hinweis auf mögliche zukünftige Wertminderungen gaben in den letzten zwei Monaten bereits die Schlagzeilen im Wall Street Journal „Barrick Gold hat kein Glück mit Kupfer“ und „Rio Tinto und der schlechteste Deal aller Zeiten“. [2]

Nicht zuletzt durch diese beiden Meldungen rückt jetzt verstärkt die Firmenwertbilanzierung in der internationalen (IFRS) und in der US-amerikanischen (US-GAAP) Rechnungslegung in den

Fokus. Bereits eine frühere, am Lehrstuhl für Rechnungswesen und Controlling der TU Bergakademie Freiberg vorgenommene Untersuchung belegt die große Bedeutung des Firmenwerts in den Bilanzen deutscher kapitalmarkt-orientierter Unternehmen. [3] Es ist zu vermuten, dass dies bei internationalen Bergbauunternehmen ähnlich ist. Im Rahmen einer neuen Untersuchung wurden die Jahresabschlüsse von ausgewählten Bergbauunternehmen der Jahre 2011 und 2012 auf die Höhe ihres Firmenwerts (Goodwill) sowie auf die diesem zugrunde liegenden Annahmen und auf ein mögliches Abschreibungspotenzial hin untersucht. [4] Da die untersuchten Unternehmen entweder nach IFRS oder nach US-GAAP bilanzieren, konzentrie-

1 Dipl.-Kfm. Sandro Veit Straub, Martin Tettenborn, M.A., Prof. Dr. Silvia Rogler, TU Bergakademie Freiberg, Professur für ABWL, speziell Rechnungswesen & Controlling

ren sich die folgenden Ausführungen auf diese beiden Bilanzierungsvorschriften.

Erstbilanzierung des Firmenwerts

Der Firmenwert setzt sich aus diversen immateriellen Werten zusammen, die nicht vom Unternehmen separiert werden können. Dazu gehören beispielsweise die Werte der Organisationsstruktur, des Kundenstamms oder der Reputation des Unternehmens. [5] Wenn diese Werte beim Kauf eines Unternehmens im Kaufpreis vergütet werden, entsteht ein derivativer Firmenwert. Da die Werte, die zu einem derivativen Firmenwert führen, nicht einzeln identifizierbar und auch nicht vom Unternehmen trennbar sind, kann im Rahmen der Erstbewertung keine eigenständige Bilanzierung dieser immateriellen Vermögenswerte vorgenommen werden. In ihrer Gesamtheit sind sie aber sowohl in der internationalen Rechnungslegung nach IFRS 3.10 wie auch in der US-Rechnungslegung nach ASC 805-30-25 aktivierungspflichtig und unter den immateriellen Vermögenswerten auszuweisen. Ihre Wertgröße ist im Zeitpunkt des Erwerbs in Höhe des Betrages anzusetzen, um den der Kaufpreis den Saldo der erworbenen identifizierbaren Vermögenswerte und der übernommenen Schulden übersteigt (IFRS 3.32 und ASC 805-30-30-I). [6] Damit hängt seine Höhe einerseits von der des Kaufpreises und andererseits vom Ansatz sowie von der Bewertung der erworbenen Vermögenswerte und von den übernommenen Schulden ab.

Speziell bei Bergbauunternehmen könnte ein derivativer Firmenwert entstehen, wenn ein steigendes Ertragspotenzial, beispielsweise durch in der Zukunft steigende Rohstoffpreise, das übernehmende Unternehmen dazu veranlassen würde, mehr für das übernommene Unternehmen zu bezahlen, als die gegenwärtig bilanzierungsfähigen Vermögenswerte – wie bspw. Maschinen, Grundstücke sowie Explorations- und Förderlizenzen, abzüglich Schulden – wert sind. Im Beispiel in *Abb. 1* beträgt der Firmenwert demnach 60 Mio. €.

Kaufpreis für übernommenen Goldförderer Gold Explorer Plc.	100
- Übernommene Vermögenswerte	80
+ Übernommene Schulden	40
= Im Abschluss anzusetzender derivativer Firmenwert	60

Abb. 1: Beispiel zur Berechnung des Firmenwerts (alle Werte in Mio. \$)

Folgebilanzierung des Firmenwerts

Sowohl in den IFRS wie auch in den US-GAAP wird der aktivierte Firmenwert als immaterieller Vermögenswert mit unbestimmter Nutzungsdauer eingestuft. Dies wird als Begründung dafür angesehen, keine planmäßigen Abschreibungen vorzunehmen. [7] Stattdessen ist jährlich ein Wertminderungstest durchzuführen (IAS 38.108 und ASC 350-20-35). [8] Da in die Bewertung des zu kaufenden Unternehmens auch die möglichen zukünftigen Erlöse aus Rohstoffverkäufen eingehen, muss das kaufende Unternehmen jährlich prüfen, ob beispielsweise die Rohstoffpreise gefallen und somit die ursprünglich kalkulierten Erlöse nach unten zu korrigieren sind. Wird eine Wertminderung festgestellt, muss eine außerplanmäßige Wertkorrektur zu Lasten des Jahresergebnisses (Gewinn) vorgenommen werden. Sollte in den Folgeperioden der Rohstoffpreis wieder steigen, so darf diese Korrektur trotzdem nicht wieder durch Zuschreibungen rückgängig gemacht werden (IAS 36.124 und ASC 350-20-35-13).

Analyse ausgewählter Geschäftsberichte

Grundlage der Untersuchung waren die Konzernabschlüsse von 30 internationalen Bergbauunternehmen der Jahre 2011 und 2012, wobei 22 Unternehmen nach den internationalen Rechnungslegungsstandards IFRS berichten und acht Unternehmen nach dem US-amerikanischen Standard US-GAAP. [9] Von diesen 30 Unternehmen wiesen durchschnittlich 21 (70 %) für das Jahr 2012 einen Firmenwert aus. Zunächst wurden, um eine Gesamtbetrachtung zu ermöglichen, der in den Konzernabschlüssen ausgewiesene Firmenwert sowie die entsprechenden Abschreibungen in ihrer absoluten Höhe betrachtet. Daran anknüpfend wurden dann die weiteren Zusammenhänge anhand von Verhältniszahlen überprüft. Dazu wurden der Firmenwert mit dem Eigenkapital und der Bilanzsumme und die Abschreibungen mit dem Firmenwert und dem Jahresergebnis ins Verhältnis gesetzt.

Da die Rohstoffpreise die ausschlaggebenden Größen für die Bestimmung des Firmenwerts sind, wurden zudem die diesbezüglichen Angaben der Unternehmen mit den aktuellen Rohstoffpreisen verglichen, um Hinweise auf die Notwendigkeit zukünftiger Wertberichtigungen zu finden.

Die drei Unternehmen mit den höchsten Firmenwerten waren zum 31. Dezember 2012 Barrick Gold Corp. (9,6 Mrd. \$), Xstrata (6 Mrd. \$) und BHP Billiton (4,1 Mrd. \$). Der Mittelwert, bezogen auf die 21 einen Firmenwert ausweisenden Unternehmen, betrug 1,9 Mrd. \$. Der Median von 1,1 Mrd. \$ weist auf die große Streuung der Firmenwerte hin.

Obwohl die absoluten Werte durchaus als bedeutsame Größen erscheinen, muss dieser Eindruck nach einem Blick auf das Verhältnis Firmenwert zum Eigenkapital relativiert werden. Für die drei genannten Unternehmen lässt sich lediglich bei Barrick Gold Corp. mit rund 40 % ein nennenswerter Anteil des Firmenwerts am Eigenkapital erkennen. Bei Xstrata (13 %) und bei BHP Billiton (6 %) ist dessen Bedeutung geringer. Der durchschnittliche Anteil des Firmenwerts am Eigenkapital bei den Unternehmen, die einen Firmenwert ausweisen, beträgt 8,6 %. Dies zeigt, dass im Gegensatz zu deutschen kapitalmarktorientierten Unternehmen aller Branchen der Firmenwert bei internationalen Bergbauunternehmen eine nur untergeordnete Rolle spielt. [10] Bei einem Vergleich der aktuellen Rohstoffpreise mit den für die Firmenwertbewertung herangezogenen Rohstoffpreisen, beispielsweise für Gold, Silber und Kupfer, fällt auf, dass bei acht Unternehmen die aktuellen Marktpreise der Rohstoffe im Schnitt um 12,65 % unter den kalkulierten Preisen liegen. Hingegen zeigt sich, dass die anderen sieben Unternehmen, die Angaben zu den kalkulierten Rohstoffpreisen machen, wesentlich konservativere Annahmen hinsichtlich der Marktpreise der Rohstoffe getroffen haben, weshalb bei diesen die aktuellen Marktpreise um 20,3 % über den kalkulierten Annahmen liegen.

Für die acht Unternehmen, die nennenswerte Steigerungen in den zukünftigen Rohstoffpreisen einkalkuliert haben, bedeutet dies, dass bei stagnierenden oder sogar fallenden Preisen eine Ergebnisbelastung von zwei Seiten her zu erwarten ist. Einerseits ist die Höhe des Firmenwerts in Frage zu stellen, wodurch Wertberichtigungen drohen, die das Ergebnis belasten. Andererseits dürfte das Ergebnis durch die gefallenen Umsatzerlöse, die beim Verkauf der Rohstoffe erzielt werden, belastet werden.

Zusammenfassung

Die Studie hat gezeigt, dass zwar 70 % der 30 untersuchten internationalen

Bergbauunternehmen Firmenwerte in den Jahresabschlüssen ausweisen, dass diese aber im Gegensatz zu deutschen kapitalmarktorientierten Unternehmen aller Branchen keine nennenswerte Bedeutung haben. Lediglich Barrick Gold Corp. hat, bezogen auf das Eigenkapital, mit rund 40% einen bedeutenden Firmenwert. Da nicht alle Unternehmen ihrer Kalkulation des Firmenwerts konservative Annahmen – bezogen auf die Rohstoffpreise – zu Grunde legen, ist bei einer weiterhin unveränderten oder sogar noch schwächeren Entwicklung der Rohstoffpreise – beispielsweise des Goldpreises – mit weiteren Wertminderungen, die die Ergebnisse des Geschäftsjahres 2013 belasten werden, zu rechnen. Positiv zu vermerken ist aber, dass im Gegensatz zu vielen deutschen kapitalmarktorientierten Unternehmen eine Abschreibung des Firmenwerts, womöglich sogar bis auf den Wert von Null, nicht zu einer unternehmensbedrohenden Situation führen dürfte.

Quellen

- 1 Verluste sind jeweils bezogen auf die Schlusskurse in US-Dollar am 26.04.2013.
- 2 Vgl. Cummins: Barrick Gold hat kein Glück mit Kupfer, veröffentlicht am 15.02.2013 und Miller: Rio Tinto und der schlechteste Deal aller Zeiten, veröffentlicht am 13.02.2013, beide unter www.wallstreetjournal.de.
- 3 Vgl. Rogler/Straub/Tettenborn: Bedeutung des Goodwill in der Bilanzierungspraxis deutscher kapitalmarktorientierter Unternehmen, in: Kapitalmarktorientierte Rechnungslegung (KoR) 7-8/2012, S. 343–351.
- 4 Die vollständige Liste der untersuchten Unternehmen steht unter www.tu-freiberg.de zum Download zur Verfügung.
- 5 Vgl. ausführlich U. Moser: Immaterielle Vermögenswerte, S. 253; J. Baetge / H.-J. Kirsch / S. Thiele, Bilanzen, S. 237.
- 6 Bei Vorliegen einer negativen Differenz entsteht ein negativer Goodwill bzw. Bargain Purchase. Dieser ist zum Erwerbszeitpunkt – nach einem Reassessment – sofort als Gewinn zu erfassen und dem Erwerber zuzurechnen (IFRS 3.34).
- 7 Vgl. C. Zwirner / J. Mugler: Werthaltigkeitsprüfung des Geschäfts- und Firmenwerts nach IAS 36, S. 445.
- 8 Vgl. dazu ausführlich J. Freiberg: Zeitpunkt des ersten goodwill impairment-Tests nach Erwerb, S. 359 f.
- 9 Für die Untersuchung wurde auf eine Unterscheidung zwischen Abschlüssen nach IFRS und US-GAAP verzichtet, da bezüglich der Firmenwertbilanzierung keine Unterschiede zwischen den Standards existieren, die Auswirkungen auf den Aussagegehalt der Untersuchung erwarten lassen.
- 10 Vgl. ausführlich Rogler/Straub/Tettenborn: Bedeutung des Goodwill in der Bilanzierungspraxis deutscher kapitalmarktorientierter Unternehmen, in: Kapitalmarktorientierte Rechnungslegung (KoR) 7-8/2012, S. 343–351.

Ganzheitliche Technologiebewertung und Technikfolgenabschätzung in Projekten zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Michael Nippa¹, Katja Schneider²

Mit der Förderinitiative „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ unterstützt das BMBF deutschlandweit mehrere Forschungsansätze für eine nachhaltige Steigerung der Versorgungssicherheit und zur Reduktion der Importabhängigkeit Deutschlands von strategisch wichtigen Metallen und Industriemineralen. Die in Summe 28 geförderten Verbundprojekte lassen sich den Forschungsclustern „Recycling“, „Materialeinsparung/Substitution“, „Urban Mining“ und „Nachhaltigkeitsbewertung“ zuordnen. Unter Federführung von Prof. Dr. Nippa (ABWL, speziell Unternehmensführung & Personalwesen) – und damit der Technischen Universität Bergakademie Freiberg – wurde eine Projektskizze für ein Begleitforschungsprojekt „INTRA r³+“ eingereicht und dieses in Kooperation mit weiteren Projektpartnern erfolgreich eingeworben.

In Ergänzung zu den überwiegend natur- und ingenieurwissenschaftlich dominierten Forschungen der einzelnen Projektverbünde übernimmt das Integrations- und Transferprojekt „INTRA r³+“, dem unter der Leitung des Helmholtz-Instituts Freiberg für Ressourceneffizienz (HIF) als wissenschaftliche Partner das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), der Lehrstuhl für Bauphysik an der Universität Stuttgart (LBP) und die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) angehören, Begleitforschungs-, Transfer- und Vernetzungsaufgaben auf den folgenden fünf Feldern:

1. Förderung der internen und externen Vernetzung der einzelnen Projektverbünde, z. B. durch Organisation von

Informationsveranstaltungen und thematischen Clustern, Nutzungsangebot für Analytik am HIF,

2. Bewertung der in den Forschungsverbänden generierten Ergebnisse und Informationen in Hinblick auf Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit sowie bezüglich einer übergreifenden gesamtwirtschaftlichen Wirkungsabschätzung der Fördermaßnahme „r³“,
3. Öffentlichkeitsarbeit (Pressearbeit, Erstellung von Printmaterialien, Internetauftritt u.v.m.),
4. Anbahnung und Weiterentwicklung von themen- bzw. projektbezogenen Kooperationen sowohl auf nationaler als auch europäischer und internationaler Ebene und
5. Förderung des Informations- und Technologietransfers für die Implementierung der Lösungsansätze in der Wirtschaft.

Die fünf Aufgabenfelder machen unabhängig von der inhaltlichen Schwerpunktsetzung deutlich, dass es den Drittmittelgebern – und hier speziell den Bundes- und Landesministerien – zunehmend wichtig ist, die ökonomischen, sozialen und ökologischen Konsequenzen von Technologieentwicklungen frühzeitig sowie möglichst objektiv und realitätsnah bewerten zu lassen, um (a) die eingesetzten finanziellen Fördermittel gegenüber einer kritischen Öffentlichkeit zu rechtfertigen, (b) Handlungsempfehlungen für zukünftige Forschungsaktivitäten zu erhalten und (c) die Akzeptanz neuer Technologien in Wirtschaft und Gesellschaft einschätzen zu können. Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Kompetenzen, die über Kostenvergleichsrechnungen, Life-Cycle-Cost-Analysen oder einfache Ökobilanzen hinausgehen, sind als integrativer Bestandteil zukunftsfähiger Technologieentwicklung und erfolgreicher Drittmittelprojektanträge unverzichtbar. Die TU Bergakademie verfügt hier quasi in personam mit ihrer wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät über

1 Prof. Dr. Michael Nippa, Professur für ABWL, speziell Unternehmensführung & Personalwesen, nippa@bwl.tu-freiberg.de

2 M. Sc. Katja Schneider, Wiss. Mitarbeiterin, Lehrstuhl für ABWL, speziell Unternehmensführung & Personalwesen, katja.schneider@bwl.tu-freiberg.de

potenzielle Wettbewerbsvorteile, die durch fakultätsübergreifende Kooperationen weiter gestärkt und nach außen hin kommuniziert werden müssen.

Im Integrations- und Transferprojekt „INTRA r³⁺“ ist der Lehrstuhl für Unternehmensführung und Personalwesen (UP) federführend verantwortlich für die inhaltliche Ausgestaltung und die Ergebnisse der Arbeitspakete „Nachhaltigkeits- und Technologiebewertung“ sowie „Screening des internationalen Umfelds“. Darüber hinaus sind Beiträge zu den anderen oben genannten Arbeitspaketen zu leisten und insbesondere auch sieben Verbundprojekte intensiv zu begleiten und zu betreuen. Zusammen mit Prof. Dr. Nippa übernimmt Katja Schneider, die nach Abschluss ihres Studiums an Universitäten in Leipzig und Moskau und eines Praktikums, u. a. bei der European Commodity Clearing AG – dem Clearinghaus der European Energy Exchange AG in Leipzig – seit Oktober 2012 als wissenschaftliche Mitarbeiterin im „INTRA r³⁺“-Projekt am UP-Lehrstuhl beschäftigt ist, diese Aufgaben.

Die Bewertung der Folgen neuer Ressourcen- und Energietechnologien, ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz wie auch speziell der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit ist – obgleich in aller Munde und sicherlich auch in gewisser Weise wissenschaftliches Modethema – beileibe kein triviales Problem, das sich mit gesundem Menschenverstand nebenbei – ggf. von Laien – erledigen lässt. Im Gegenteil, es ergibt sich eine Reihe von konzeptionellen und methodischen Herausforderungen, die im Folgenden exemplarisch skizziert werden sollen.

Zunächst stellen sich einige grundlegende Fragen, die nur auf den ersten Blick und von Ignoranten als Haarspalterei abgetan werden können: Was umfassen denn eigentlich die Begriffe Ressource und Ressourceneffizienz? So wird beispielsweise auch von Humanressourcen, von Umweltressourcen, von den Ressourcen Kapital oder Zeit gesprochen. Effizienz ist sogar in der Ökonomie Gegenstand hitziger wissenschaftlicher Debatten und teilweise konträrer Ansichten (z. B. Quinn & Rohrbaugh, 1983) und vor allem auch fundamentaler Bewertungsversuche (z. B. Scholz, 1992). In den Natur- und Ingenieurwissenschaften werden mitunter ganz andere Effizienzbegriffe verwendet und vielfach nach deterministischen Lösungen gesucht, die geschlossene Systeme voraussetzen,

die im Regelfall aber nur bei einem rigiden – um nicht zu sagen unrealistischen – Annahmengerüst existieren. Welche Zieldimensionen müssen/sollten bei einer möglichst ganzheitlichen, integrativen Bewertung von Ressourceneffizienz einbezogen werden? Damit hängt auch die Frage zusammen, welche Interessengruppen mit ihren Zielen berücksichtigt werden müssen, sollen oder können. Die beteiligten Industrieunternehmen sind beispielsweise bei einem Projekt zur Substitution eines knappen mineralischen Rohstoffs primär daran interessiert, dass die Herstellkosten ihres Produkts nicht steigen, die Bundesregierung an nationaler Unabhängigkeit, die Gewerkschaften am Erhalt von Arbeitsplätzen, die Umweltorganisationen an einer globalen Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und Entwicklungsländer an wirtschaftlichem Aufschwung und Verhinderung sozialer Unruhen durch eine Reduzierung der Jugendarbeitslosigkeit. Wie sind die Ziele zu gewichten? Wie geht man mit Zielkonflikten (z. B. Reduzierung des Einsatzes eines gefährlichen Rohstoffs versus Erhöhung des CO₂-Ausstoßes) um? Nicht selten muss man bei der Bewertung der Technikfolgen auch mit Risiken und Wahrscheinlichkeiten argumentieren und rechnen, die es – oftmals vor dem Hintergrund sich widersprechender wissenschaftlicher Studien – ebenfalls seriös abzuschätzen und zu gewichten gilt. Man denke dabei nur an die von Spekulationen zusätzlich erschwerten Preisprognosen für wichtige Rohstoffe oder an die Gefahr der Verunreinigung des Grundwassers beim Fracking-Verfahren. Folgerichtig ergibt sich die Frage und Herausforderung: Wie lassen sich wichtige von eventuell weniger relevanten Einflussfaktoren abgrenzen, Parameter und, sofern vorhanden und bekannt, Kausalbeziehungen operationalisieren und messen? Um es für den interessierten Leser auf einen Punkt zu bringen: Wenn Sie schon Probleme damit haben, zu bewerten, ob Sie Ihr altes Auto noch weiter fahren wollen, sich ein neues umweltfreundlicheres, aber gleichzeitig kostengünstigeres/familienfreundliches und auch noch schickes Auto kaufen oder auf einen Roller, ein Fahrrad oder auf den öffentlichen Nahverkehr umsteigen wollen: Warum sollte das bei komplexen Entscheidungsproblemen zur Ressourceneffizienz anders sein – auch wenn von verschiedenen, häufig auch wissenschaftlichen Institutionen sug-

geriert wird, dass man zu belastbaren deterministischen Lösungen kommen kann? Es stellt sich unseres Erachtens zusammenfassend die Frage: Wie kann mit den vielfältigen Herausforderungen umgegangen werden, die der Begriff und eine Bewertung von Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit mit sich bringen, und welche Lösungsmöglichkeiten bieten sich an, um eine womöglich einseitig ausgerichtete, oberflächliche und rein kurzfristig orientierte Betrachtung zu vermeiden?

Unsere bisherigen Recherchen zeigen, um auf die erste Herausforderung zurückzukommen, dass der Begriff Ressourceneffizienz sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene gegenwärtig noch keine abschließende und einheitliche Definition erfahren hat. Hinzu kommt, dass sich die unterschiedlichen Begriffsverständnisse mitunter diametral gegenüberstehen. Während etwa das VDI-Zentrum Ressourceneffizienz eine primär ökologische Sichtweise des Begriffs wählt, scheint dem Begriffsverständnis z. B. der Europäischen Kommission eher eine ökonomische Perspektive zu Grunde zu liegen (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2013; Europäische Kommission, 2011).

Die zweite Herausforderung besteht – wie oben erwähnt – in der Heterogenität der mit Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit verbundenen Ziele und Perspektiven, einschließlich ihrer Wechselwirkungen. So ist beispielsweise nicht abschließend geklärt, ob mit dem Ziel der Ressourceneffizienz primär ökologische oder auch technologische, ökonomische, soziale, ethische und/oder politische Interessen verfolgt werden sollen. Neben unterschiedlichen Prioritäten sind auch vielfältige Zielbeziehungen und -konflikte sowie unterschiedliche Gewichtungen zwischen den einzelnen Zielen sehr wahrscheinlich, die adäquat berücksichtigt werden müssen.

Die mit der Operationalisierung von direkten und indirekten Parametern und Moderatoren verbundenen Fragestellungen sind als weitere Herausforderung anzusehen. Unterschiedliche, fest verankerte Wertvorstellungen, fehlende oder nur schwer zu bestimmende eindeutige und einseitig gerichtete Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sowie die schwierige Quantifizierung ausgewählter (sozialer und ökologischer) Zielgrößen stellen dabei ebenso große Herausforderungen dar, wie der dynami-

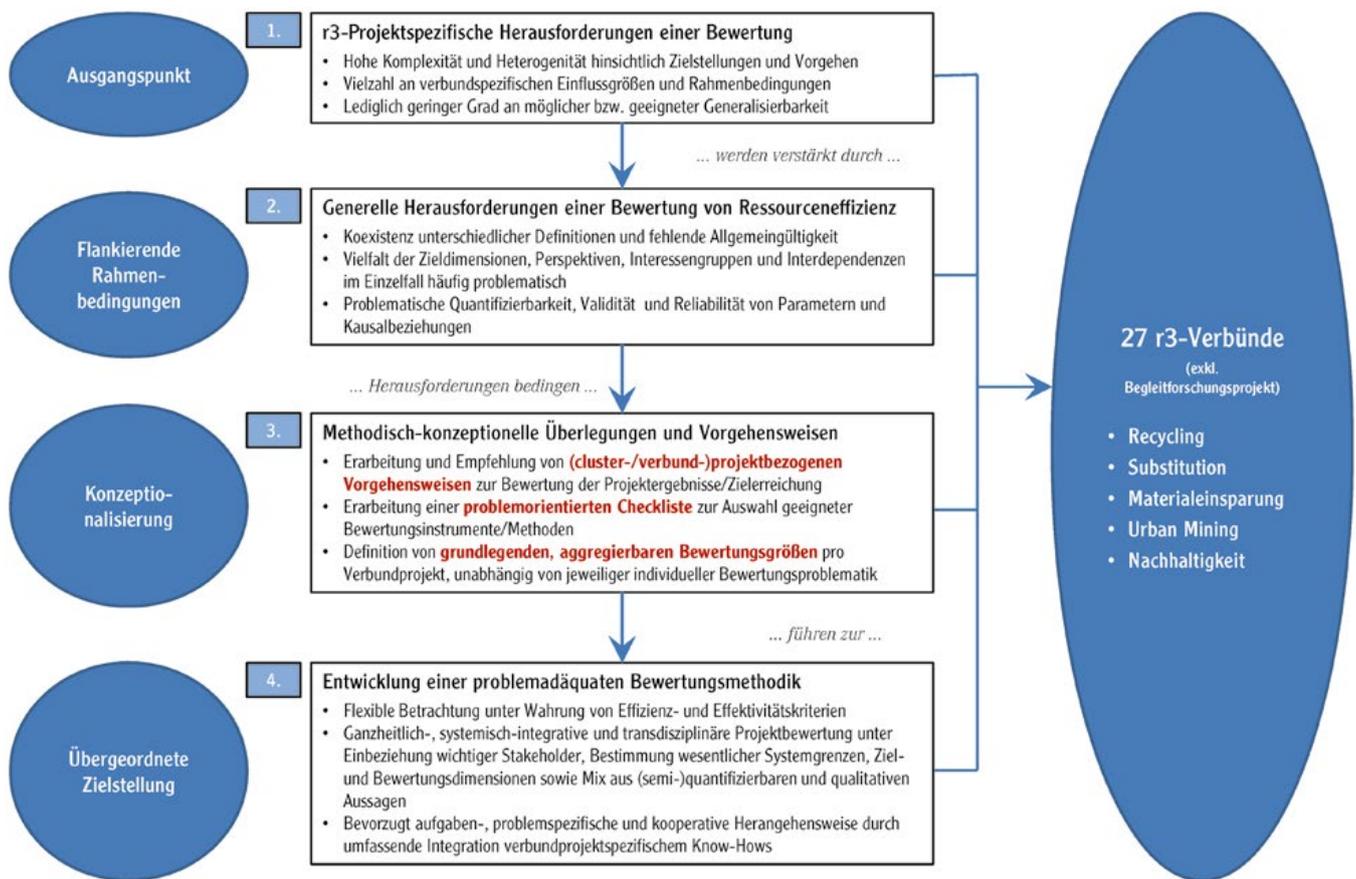


Abb. 1: Entwicklung einer Methodik zur Ressourceneffizienzbewertung am Beispiel der BMBF-Fördermaßnahme r³

sche Charakter von bestimmten Zielen und generell auch der Zeithorizont bei der Bestimmung unterschiedlicher Ziele und Zielerreichungsgrade.

Den gegenwärtigen Stand der Arbeiten an der bis zum Beginn des Jahres 2016 terminierten Förderinitiative „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ betreffend, und damit auch des Integrations- und Transferprojekts „INTRA r³⁺“, sind deutliche Unterschiede im Vergleich zur Vorläuferinitiative r² zu erkennen. Dazu zählt insbesondere die Heterogenität der 27 r³-Forschungsverbünde (ohne Einbeziehung des Begleitforschungsprojekts), die sich in inhaltlich sehr vielfältigen und komplexen Problemstellungen und Partnerkonstellationen äußert und die Anwendung einer einheitlichen Bewertungsmethodik, eines für alle Projekte generalisierbaren Bewertungsrasters erschwert, wenn nicht ganz unmöglich macht.

In Kooperation mit den inhaltlich eingebundenen, speziell auch mit wertvollen Erfahrungen aus dem Vorläuferprojekt r² ausgestatteten wissenschaftlichen Partnern der FhG ISI, FhG ICT und dem LBP der Universität Stuttgart haben wir daher drei unterschiedliche Vorge-

hensweisen für die Nachhaltigkeitsbewertung herausgearbeitet und vorgeschlagen, die einzeln oder kombiniert angewendet werden können. Wichtige Abgrenzungskriterien waren dabei die Detaillierungstiefe und der Erstellungsaufwand der jeweiligen Projektanalyse.

Zu bevorzugen ist unseres Erachtens eine verbundprojektbezogene, d. h. situationsadäquate Analyse und Bewertung. Dazu ist es notwendig, die Aufgabenstellung und die damit verbundenen Zielsetzungen des jeweiligen Projektverbunds nachzuvollziehen und darauf aufbauend Effizienzkriterien, methodische Vorgehensweisen, Operationalisierungen und Ergebnisdarstellungen festzulegen. Das setzt die Bereitschaft sowohl seitens der Bewerter bzw. Verbundprojektbetreuer als auch der handelnden Personen des jeweiligen Verbundprojekts voraus, eng miteinander zu kooperieren. Wenngleich die detaillierte Analyse der Projektvorhabensbeschreibungen und sonstiger projektrelevanter Informationen mit dem Ziel der Identifikation von Bewertungsproblematiken und Lösungsmöglichkeiten für eine möglichst ganzheitliche Betrachtung projektspezifischer Ressourceneffizienz einen guten ersten Einstieg bietet, so ist im Weiteren in

enger Abstimmung mit den Verbundprojektverantwortlichen ein geeignetes und zugleich möglichst effizientes Bewertungsvorgehen zu erarbeiten, um zum einen das fachspezifische Wissen der Projektverbünde und zum anderen möglichst verallgemeinerbare sowie zugleich projektspezifische Bewertungsgrößen umfassend abzubilden.

So haben wir bereits mehrere bilaterale Workshops mit Projektkoordinatoren einzelner r³-Verbünde und Projektcluster organisiert und durchgeführt. Beispielsweise wurden etwa die r³-Projekte „PhytoGerm“ (Germaniumgewinnung aus thermisch verwerteter Biomasse), „ZwiPhos“ (Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonverbrennungsgaschen zur späteren Phosphorrückgewinnung) sowie die zum r³-Haldencluster gehörenden Projekte „ReStrateGIS“ (Entwicklung eines bundesweiten Ressourcenkatasters für Hüttenhalden mittels Geoinformationstechnologien), „SMSB“ (Gewinnung von Metallen aus Bergbauhalden in Sachsen) und „ROBEHA“ (Rückgewinnung von Wertstoffen aus Berge- und Hüttenhalden im Westharz) hinsichtlich möglicher Bewertungsstufen und -verfahren sowie dabei zu berücksichtigender Kriterien

und Einflussfaktoren untersucht sowie erste Ergebnisse dokumentiert. Mit Blick etwa auf die Projekte des r³-Haldenclusters bestätigt unsere bisherige Analyse recht unterschiedliche und komplexe Frage- und Zielstellungen sowie Vorgehensweisen bei allen drei Verbundprojekten. Zugleich zeigt die Analyse der Vorhaben Überschneidungen in Bezug auf die abzudeckenden einzelnen Prozessschritte bei der Rückgewinnung von Wertstoffen aus Halden. Diese Schritte lassen sich im Rahmen eines fünfstufigen Phasenmodells, bestehend aus Identifikation, Erkundung und Analyse des Haldenkörpers (Phasen 1 und 2), Entwicklung, Prüfung und Bewertung des Gewinnungsverfahrens (Phase 3), Öffnung und Abbau des Haldenkörpers (Phase 4) sowie finale Bereitstellung der Rohstoffe (Phase 5), abbilden. In unseren weiteren Arbeiten soll nun jede dieser Phasen detailliert werden, um relevante (ggf. vorhabenspezifische) Aspekte für eine ganzheitliche Technologiebewertung und Technikfolgenabschätzung herauszuarbeiten. Diese können später für die Praxis in allgemeiner Form zugänglich gemacht werden. Dabei werden neben ökologischen Aspekten, wie den Wert- und Schadstoffpotenzialen der Halden, auch ökonomische Belange, wie z. B. Investitions- und Kostenabschätzungen für die Technikbereitstellung oder notwendige Genehmigungsverfahren berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch sozio-ökonomische, sozio-politische und sozio-kulturelle Aspekte in die Bewertungsproblematik integriert. Dazu zählen beispielsweise auch Betrachtungen zur Akzeptanz und zur Offenheit gegenüber innovativen Technologien zur Steigerung der Ressourceneffizienz oder zu Veränderungen von Arbeits-

platzstrukturen und Risikoabschätzungen. Eine anhaltend positive Resonanz erzielte die oben dargestellte verbundvorhabensspezifische Vorgehensweise, insbesondere seitens der Praxispartner weiterer r³-Verbünde, die im Rahmen von Projekttreffen mehrheitlich ebenfalls die Meinung vertreten, dass den vielfältigen Herausforderungen der Bewertung von Ressourceneffizienz durch eine primär individuelle, situations- und projektspezifische Betrachtung am besten entsprochen werden kann.

Im Zuge des Projekts wollen wir auf einer zweiten Aggregationsebene für ähnlich gelagerte Fälle der Bewertung von Ressourceneffizienz und (Ressourcen-)Technologiefolgen Checklisten und grobe Vorgehensbeschreibungen entwickeln, die es bei zukünftigen Vorhaben erleichtern, eine geeignete Bewertungsmethodik auszuwählen und situationsadäquat anzupassen. Schließlich unterstützen wir auf der dritten Ebene unsere Projektpartner LBP und FhG ISI bei der Erfassung hochaggrierter Input- und Outputgrößen, die entweder in Verbindung mit der Erfahrungsdatenbank „GaBi“ oder auf der Basis von Expertenwissen zur gesamtwirtschaftlichen Ergebnisrechnung genutzt werden können, um die ökologischen und ökonomischen Makrodaten fundiert abzuschätzen. Die *Abbildung 1* gibt einen Überblick über die von uns skizzierten Herausforderungen und zu ersten methodisch-konzeptionellen Überlegungen für eine möglichst ganzheitliche Bewertung der r³-Projekte zur Steigerung von Ressourceneffizienz.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Art interdisziplinärer Projekte und Zusammenarbeit gerade auf dem Gebiet zukunftsrelevanter Ressourcen- und Energietechnologien die große

Chance bietet, eingetretene Trampelpfade ingenieur- und wirtschaftswissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung zu verlassen, um gemeinsam verlässlichere und wissenschaftlich belastbare Methoden zur ganzheitlichen Technologiebewertung und Technikfolgenabschätzung in Projekten zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu entwickeln und anzuwenden.

Der interessierte Leser findet weitergehende Informationen zur vom BMBF geförderten Programminitiative r3 über <http://www.fona.de/de/9815> und <http://www.ptj.de/r3-ressourceneffizienz>, zu allen Verbundprojekten, insbesondere zum Integrations- und Transferprojekt „INTRA r³+“ über die offizielle Projektwebseite <http://www.r3-innovation.de/> und zu unseren speziellen Vorgehensweisen und Ergebnissen über <http://tu-freiberg.de/fakult6/up/forschung/projekte/intra>. Gern beantworten wir Ihre Fragen oder stehen Ihnen zur Diskussion neuer Ideen zur Verfügung.

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung dieses Projekts unter dem Förderkennzeichen 033R070.

Quellen

- Europäische Kommission. (2011). Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa, KOM(2011) 571. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0571:FIN:DE:PDF>, pp. 1-29.
- Quinn, R. E., & Rohrbaugh, J. (1983). A Spatial Model of Effectiveness Criteria: Towards a Competing Values Approach to Organizational Analysis.“ *Management Science*, 29(3), pp. 363-377.
- Scholz, C. (1992). Effektivität und Effizienz, organisatorische.“ In: Handwörterbuch der Organisation, 3. Aufl. hrsg. von E. Frese, pp. 533-552.
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz. (2013). Begriffsdefinition Ressourceneffizienz. <http://www.vdi-zre.de/home/was-ist-re/begriffsdefinition/>, zuletzt eingesehen am 17.07.2013.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuiversität. Seit 1765.

Die Ressourcenuiversität für eine nachhaltige Stoff- und Energiewirtschaft

RESSOURCEN FÜR DIE ZUKUNFT –
die Themen im Studium,
beispielsweise mit den Schwerpunkten:

- Ressourcenwirtschaft,
- Regenerative Energieanlagen,
- Solarthermie,
- Geothermie,
- Photovoltaik ...



Heimische Geopotenziale I

Wertstoffe aus Bergbauhalden

Inga Osbahr¹, Philipp Büttner¹, Jens Gutzmer^{1,9}, Martin Bertau⁴, Christin Fritze⁸, Gerhard Heide², Eberhard Janneck⁶, Reinhard Kleeberg², Thomas Leißner³, René Luhmer², Mirko Martin⁶, Jörg Matschullat², Carsten Pätzold⁴, Urs Peuker³, Ulrich Peuser⁷, Michael Stelter⁵

Im Erzgebirge wurde über Jahrhunderte hinweg Erzbergbau betrieben. Abhängig vom Stand der Technik wurden nicht auszubringende oder nicht verwertbare Bestandteile des geförderten Gesteins aufgehaldet. Daher existieren als Hinterlassenschaft des Erzbergbaus des vorigen Jahrhunderts auch heutzutage noch etliche große Bergehalden, Spülhalden und Waschsandhalden aus der Aufbereitung sowie Schlacke- und Flugstaubablagerungen aus der Verhüttung. Diese Halden enthalten noch für die damalige Aufbereitung zu fein verwachsenes Material bzw. Restkonzentrationen der abgebauten Erzmehalle – z. B. Zinn, Zink, Silber oder Wolfram – und Begleitelemente, wie Lithium oder Indium. Einige der Metalle, die bei der historischen Gewinnung wirtschaftlich von geringem Interesse waren, sind heute von wirtschaftsstrategischer Relevanz.

Das Verbundprojekt SMSB „Gewinnung strategischer Metalle und anderer Mineralien aus sächsischen Bergbauhalden“ ist Bestandteil der Fördermaßnahme „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Als Teil der r³-Fördermaßnahme kooperiert das Projekt SMSB eng mit zwei themenverwandten Vorhaben, die sich mit der Erkundung von Halden im Harz und in Thüringen bzw. im Saarland beschäftigen. Neben einem interdisziplinären Team aus Geowissenschaftlern, Verfahrenstechnikern,



Abb. 1: Bohrwagen der Bohrgesellschaft Roßla mbH während der ersten Bohrkampagne auf der Spülhalde Münzbachtal. Bei dem angewendeten Bohrverfahren handelt es sich um Rammkernbohrungen mit PVC-Linern.

Chemikern und Metallurgen der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TU BAF) beteiligen sich die Firmen G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH, SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH sowie AKW Apparate+Verfahren GmbH aus Hirschau in Bayern als Verbundpartner an dem Projekt. Die Koordination des Projekts übernimmt das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF). Die Projektpartner streben an, den Wertstoffinhalt großer Halden aus dem Erzbergbau des letzten Jahrhunderts zu erfassen und mögliche Technologien

zur Separation der Wertkomponenten zu testen. Die Entwicklung eines exemplarischen Verfahrens für die wirtschaftliche und umweltschonende Gewinnung wirtschaftsstrategisch wichtiger Rohstoffe aus den untersuchten Haldenkörpern ist das ultimative Ziel. Im Rahmen des Projekts soll außerdem ein Haldenkataster entstehen, das Informationen über geografische Lage, Eigentumsverhältnisse, Herkunft des Haldenmaterials, Aufbau der Halde, Wertstoffgehalte und Wertschöpfungspotenzial der 20 größten Bergbauhalden Sachsens enthält. Informationen über mögliche Abbau-, Aufbe-

- 1 Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
- 2 Institut für Mineralogie, TU Bergakademie Freiberg (TUBAF)
- 3 Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik, TUBAF
- 4 Institut für Technische Chemie, TUBAF
- 5 Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinstoffe, TUBAF
- 6 G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH
- 7 AKW Apparate+Verfahren GmbH
- 8 Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH
- 9 **Kontakt:** Prof. Jens Gutzmer, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Halsbrücker Straße 34, 09599 Freiberg, j.gutzmer@hzdr.de, Tel. 0351 2604400

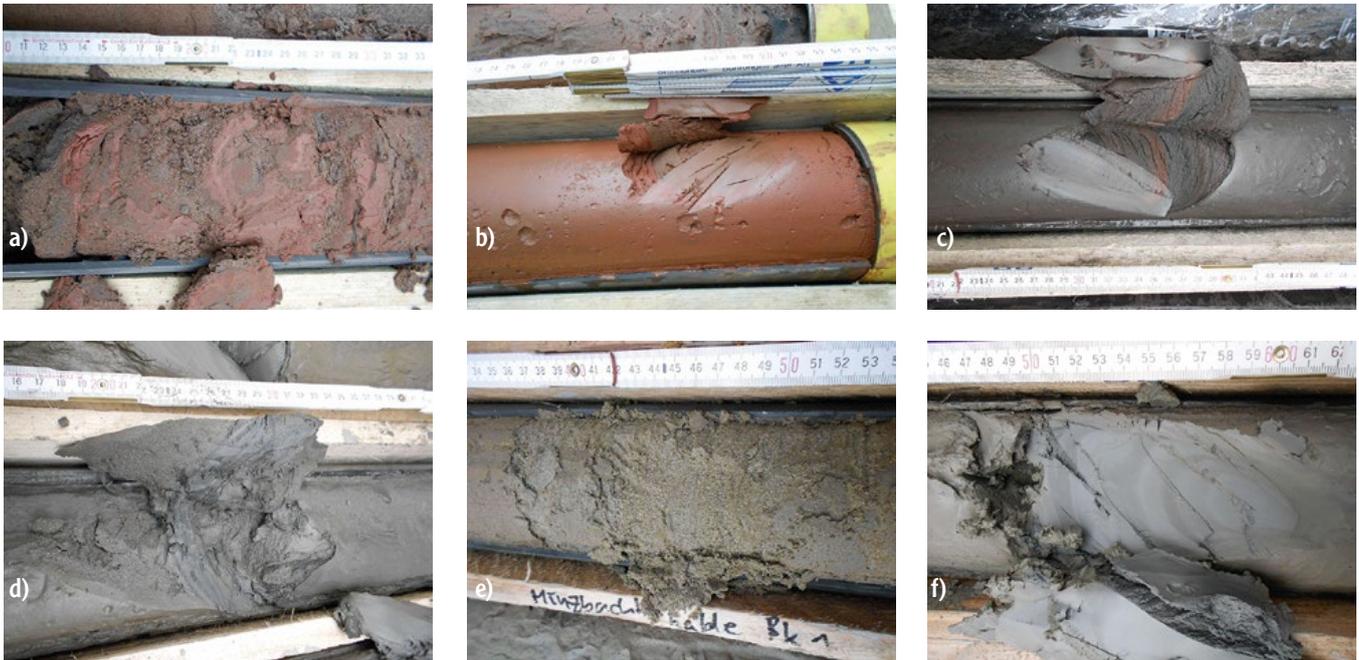


Abb. 2: Frisches Haldenmaterial der vier Spülhalden. a) Altenberg: grobkörnigerer, trockener Abschnitt bei 11,20 m, b) Altenberg: feinkörnigerer, wassergesättigter Abschnitt bei 29,80 m, c) Davidschacht: rötliche feinkörnige Lage bei 16,30 m, d) Ehrenfriedersdorf: dunkelgraues Material bei 14,20 m, e) Münzbachtal: grobkörnigerer trockenerer Abschnitt bei 2,40 m, f) Münzbachtal: feinkörnigerer feuchterer Abschnitt bei 9,50 m

reitungs- und Gewinnungstechnologien sowie deren Kosten sollen in einem Methodenhandbuch formuliert werden.

Erkundungsbohrungen

Für eine erste Bohrkampagne wurden vier Standorte ausgesucht, auf denen jeweils eine Probebohrung niedergebracht wurde. Es handelt sich um die Spülhalden Davidschacht und Münzbachtal in Freiberg, die Tiefenbachhalde in Altenberg und die Spülhalde 1 in Ehrenfriedersdorf. Bei dem angewendeten Bohrverfahren handelt es sich um Rammkernbohrungen mit PVC-Linern (Abb. 1). Dieses Verfahren ermöglicht eine weitestgehend ungestörte Beprobung des unverfestigten, hauptsächlich feinkörnigen Haldenmaterials. Die Abbildung 2 zeigt das frische Material der vier Halden in den PVC-Linern. Insgesamt sind in Altenberg 31 m, in Ehrenfriedersdorf 17 m, am Davidschacht 30 m und im Münzbachtal 29 m bis zum Haldenboden abgebohrt worden. Das Altenberger Haldenmaterial zeigt eine rötliche Farbe (Abb. 2a und b), was in erster Linie von dem enthaltenen Eisenoxidmineral Hämatit herrührt. Man kann optisch unterscheiden zwischen einem grobkörnigeren trockeneren Abschnitt bis in eine Tiefe von ca. 12 m (Abb. 2a) und einem etwas feinkörnigeren wassergesättigten Abschnitt (Abb. 2b).

Abb. 3 zeigt eine mikroskopische Aufnahme des Altenberger Haldenmaterials



Abb. 3: Mikroskopische Aufnahme des Altenberger Haldenmaterials im Auflicht in 100-facher Vergrößerung. Neben Quarz sind verschiedene Glimmer (Hell- und Dunkelglimmer) enthalten. Die rötliche Farbe wird durch fein verteilten Hämatit hervorgerufen.

im Auflicht. Neben Quarz als Hauptbestandteil sind u. a. unterschiedliche Glimmervarietäten (Hell- und Dunkelglimmer) zu erkennen. Die rötliche Färbung wird, wie bereits erwähnt, durch fein verteilten Hämatit hervorgerufen. Eine bereits durchgeführte Fraktionierung zeigt, dass der Hämatit größtenteils in der Fraktion $<20 \mu\text{m}$ vorkommt. Qualitative Analysen mittels Röntgendiffraktometrie (Abb. 4) ergaben Quarz, Hämatit, Orthoklas, Hell- und Dunkelglimmer, Topas, Kaolinit, Kassiterit, Fluorit und Chlorit.

Das Haldenmaterial vom Davidschacht, vom Münzbachtal und aus Ehrenfriedersdorf zeigt jeweils eine dunkelgraue Farbe und weist optisch kaum Unterschiede auf (Abb. 2c-f). Auch hier ist teilweise eine Wechsellagerung zwischen fein- und grobkörnigerem Material mit bloßem Auge zu erkennen, z. B.

im Münzbachtal mit grobkörnigeren Abschnitten im oberen Bereich der Halde (Abb. 2e) und feuchteren feinkörnigeren Bereichen ab etwa 9 m Tiefe (Abb. 2f).

Charakterisierung des Probenmaterials

Je nach Standort stehen unterschiedliche Elemente und Minerale im Fokus. In den Freiburger Halden sind sulfidische Erzminerale (z. B. Zinkblende, Bleiglanz, Pyrit, Arsenopyrit) prominent, und erhöhte Gehalte von Blei, Zink, Silber, Indium und Germanium sind von besonderem Interesse. Eine komplexe Mischung von oxidischen (Cassiterit, Wolframit), sulfidischen (Molybdänit) Erzmineralen und silikatischen (Li-reiche Glimmer, Topas) Komponenten ist in den Halden in Ehrenfriedersdorf bzw. in Altenberg anzutreffen (Hösel 1994; Weinhold 2002). Das bei den vier Halden gewonnene Probenmaterial (insgesamt 107 Bohrmeter) wird genutzt, um den Wertstoffinhalt und die physikalischen und physikochemischen Eigenschaften des Haldenmaterials zu ermitteln. Mit der mineralogischen und geochemischen Analyse befasst sich das Institut für Mineralogie. Ergebnisse zur tiefenabhängigen Elementverteilung aus Röntgenfluoreszenzanalysen liegen vor. Partikelgrößenverteilungen wurden per Lasergranulometer und Nasssiebung am Institut für mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik er-

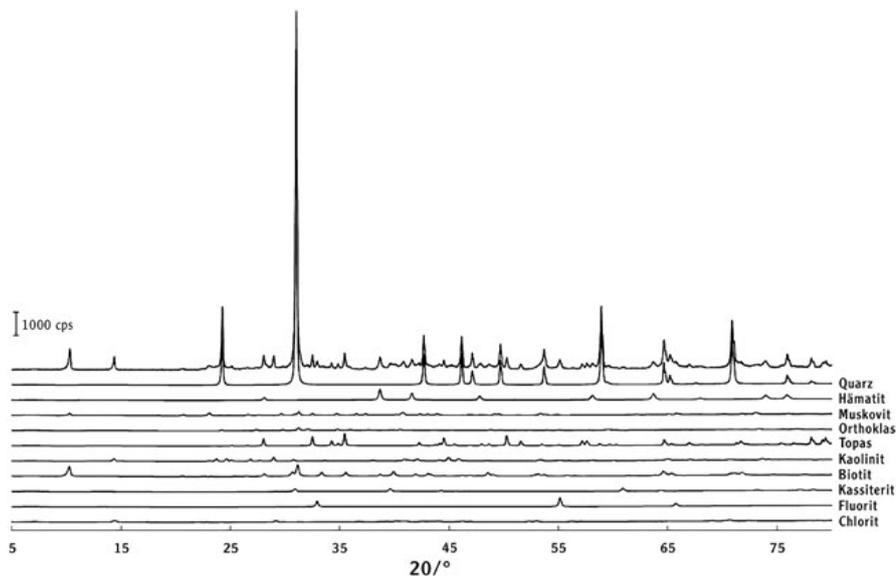


Abb. 4: Röntgendiffraktogramm des Altenberger Haldenmaterials (Co-K α -Strahlung). Erste qualitative Analysen mittels der Röntgendiffraktometrie ergeben eine Zusammensetzung aus Quarz, Hämatit, Hell- und Dunkelglimmer, Orthoklas, Topas, Kaolinit, Kassiterit, Fluorit und Chlorit.

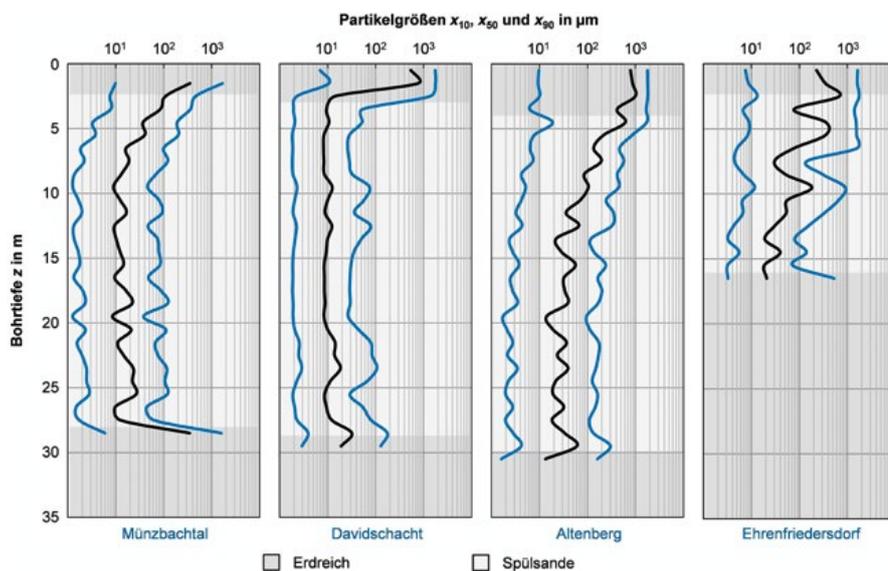


Abb. 5: Gegenüberstellung charakteristischer Partikelgrößen über der Bohrtiefe für die im Rahmen der Bohrkampagne untersuchten Spülsandhalden. Zu beachten ist die logarithmische Auftragung der Partikelgröße. Für jedes Bohrsegment wurden die Partikelgrößenverteilungen als Massenverteilungen ermittelt und die Kennwerte x_{10} , x_{50} (Medianwert der Verteilung) und x_{90} errechnet. Die Berechnung dieser Kennwerte erfolgte durch lineare Interpolation zwischen dem nächstgrößeren und nächstkleineren Messpunkt der Verteilung.

mittelt. Sie reflektieren Informationen über die Verteilung von fein- und grobkörnigem Material innerhalb der Halde. Die in Abb. 5 gezeigten Resultate belegen, dass die Partikelgrößen teilweise erheblich differieren. Es ist zu erwarten, dass die Partikelgrößenverteilung nicht nur vertikal, sondern auch lateral innerhalb des Haldenkörpers erheblich variiert. So sind überwiegend gröbere Partikelgrößen am Rande, feinere dagegen im Zentrum der Haldenkörper zu erwarten. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden repräsentative Bohrkernabschnitte

für eine detaillierte mineralogische und geochemische Untersuchung ausgewählt. An diesen Proben testen wir z. Z. methodische Entwicklungen zur Mineralanalytik.

Technologien

Aufbauend auf relevanten Rohstoffcharakteristiken werden Versuche durchgeführt, um den Wertstoffinhalt nutzbar zu machen. So wird die Firma G.E.O.S. aus Freiberg an dem Probenmaterial die Isolierung und die Adaption geeigneter Mikroorganismen vornehmen sowie an-

schließend Labor- und kleintechnische Versuche zur Biolaugung durchführen. An der TU BAF befasst man sich am Institut für Technische Chemie mit chemischen Laugungsversuchen. Die Wissenschaftler des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik werden sich mit der Aufbereitung der polymetallischen Sulfid- und Oxiderze durch Flotation auseinandersetzen und sich auf die Anwendung physikalischer Trennverfahren konzentrieren. Hier stehen der Aufschluss feinstverwachsener Erzminerale mit anschließender Trennung der freigesetzten Körner von assoziierten Gangarten und das Gewinnen früher nicht ausgebrachter, aufgeschlossener und feinstkörniger Wertminerale zur Erzeugung marktfähiger Erzkonzentrate im Vordergrund der Untersuchungen. Das Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinststoffe wird sich mit hydro- und pyrometallurgischen Verfahren auseinandersetzen. Die Firma AKW Apparate und Verfahren unterstützt das Projekt bei der Planung und bei der Übertragung von Aufbereitungsversuchen in den großtechnischen Maßstab.

Basierend auf den Ergebnissen der ersten Bohrkampagne will man aus den vier bereits angebohrten Halden für eine zweite Bohrkampagne Ende 2013 die zwei Halden mit dem größten Wertstoffpotenzial auswählen. An diesen beiden Standorten werden dann rasterförmig angeordnete zusätzliche Bohrungen niedergebracht. Erst dann kann ein erster Eindruck von den Details des Aufbaus der Halde gewonnen sowie genügend Material für großtechnische Aufbereitungsversuche entnommen werden. Die Ergebnisse des interdisziplinären Forschungsprojekts sollen in einer abschließenden ökologischen und ökonomischen Aussage zum Wertstoffpotenzial und zur Sinnhaftigkeit eines Rückbaus von Halden aus dem historischen Bergbau münden.

Literatur

- Hösel, G. (unter Mitarbeit von Hoth, K., Jung, D., Leonhardt, D., Mann, M., Meyer, H., Tägl, U.) (1994) „Das Zinnerz-Lagerstättengebiet Ehrenfriedersdorf/Erzgebirge“ – Bergbaumonographie. Reihe: Bergbau in Sachsen, Band 1. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radebeul, und Sächsisches Oberbergamt, Freiberg (Hrsg.)
- Weinhold, G. (unter Mitarbeit von Becker, M., Bernhardt, H., Kühn, M., Siegert, J.) (2002) „Die Zinnerz-Lagerstätte Altenberg/Osterzgebirge“. Reihe: Bergbau in Sachsen, Band 9. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radebeul, und Sächsisches Oberbergamt, Freiberg (Hrsg.)

Heimische Geopotenziale II

E3 – Rohstofferkundung im Erzgebirge mittels Geophysik

Inga Osbahr¹, Stefan Buske², Klaus Spitzer², Michael Eiermann³, Bernhard Siemon⁴,
Uwe Meyer⁴, Jens Gutzmer^{5,7}, Richard Gloaguen⁵, Saskia Stein⁵, Uwe Lehmann⁶



Abb. 1: BGR-Hubschrauber mit HEM-Sonde (Quelle: BGR)

Im Januar dieses Jahres hat das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) in Kooperation mit der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie dem Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) einen Antrag auf eine wissenschaftliche Aufsuchungsgenehmigung für ein Gebiet im Raum Geyer im Erzgebirgskreis gestellt. Das damit einhergehende Forschungsprojekt hat das Ziel, mittels geophysikalischer Verfahren das Rohstoffpotenzial des geologischen Untergrunds bis in eine Tiefe von ca. 500 m zu erfassen. Alle relevanten Daten, die im Rahmen dieser Aufsuchung erhoben werden, sollen genutzt werden, um ein 3D-Modell des geologischen Untergrunds im Aufsuchungsgebiet zu erstellen. Sowohl dieses Modell als auch die ihm zugrundeliegenden Daten sollen mit Abschluss des auf drei Jahre ausgelegten Projekts veröffentlicht werden.

1 Institut für Mineralogie, TU Bergakademie Freiberg (TUBAF)

2 Institut für Geophysik und Geoinformatik, TUBAF

3 Institut für Numerische Mathematik und Optimierung, TUBAF

4 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

5 Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

6 Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

7 Kontakt: Prof. Jens Gutzmer, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Halsbrücker Straße 34, 09599 Freiberg, j.gutzmer@hzdr.de, Tel. 0351 2604400

Geologischer Rahmen

Das Untersuchungsgebiet „Geyerscher Wald“ liegt im Grenzbereich zwischen der Erzgebirgszentral- und der Erzgebirgsnordrandzone. Am geologischen Aufbau des Gebiets sind im Wesentlichen neoproterozoische, kambrierte und ordovizische Metamorphite sowie permosilesische Magmatite beteiligt (Hösel 1996). Insbesondere im Gebiet Geyer-Ehrenfriedersdorf ist eine Granithochlage aufgeschlossen, die neben sulfidischen und oxidischen schichtgebundenen Skarnkörpern Potenzial für Greisenkörper und gangartige Zinnvererzungen bietet.

Im Gebiet um Geyer sind mehrere Lagerstätten bekannt. Sie waren Gegenstand historischen Bergbaus und sind durch geologische Erkundungsarbeiten in den letzten fünf Jahren wieder in den Fokus des Interesses gerückt. Besonders prominent sind hierbei stockwerkartige Sn-reiche Greisenlagerstätten, wie sie in Ehrenfriedersdorf und Geyer aufgebaut worden sind. Der sog. „Zwitterstock“ von Geyer gilt als locus typicus für diesen Lagerstättentyp (Baumann et al. 2000). Ebenfalls weit verbreitet sind Skarnlagerstätten, die reich an Sn, Zn, In und Fe (Magnetit) sein können. Diese werden aktuell durch Explorationsfirmen neu erkundet.

Es besteht eine enge räumliche Beziehung zwischen dem Relief der Granitoberfläche und den beiden genannten

Lagerstättentypen, die dem spät- bis postvariszischen Mineralisationszyklus zugeordnet werden können (Baumann et al. 2000). Zur Identifizierung der verschiedenen Mineralisationstypen ist es daher u. a. notwendig, den genauen Verlauf der Granithochlage zu bestimmen. Allgemein sind Skarnlagerstätten an Karbonatgesteine im Granitkontakt gebunden, während Greisenlagerstätten sowohl im Endo- als auch im Exokontakt zum Granit auftreten können.

Geophysikalische Erkundungsmethoden

Das Projekt fokussiert sich auf die Anwendung und Weiterentwicklung moderner geophysikalischer Erkundungsmethoden. Anders als Erkundungsbohrungen sind geophysikalische Methoden flächendeckend und nichtinvasiv. Geophysikalische Methoden, die man für die Aufsuchung nutzt, können insbesondere hubschrauber- oder bodengestützt sein. Mit den gleichzeitig eingesetzten aerogeophysikalischen Verfahren Frequenzelektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD) werden zunächst flächendeckende Übersichtsmessungen im Aufsuchungsgebiet ausgeführt. Die dazu notwendige erste Befliegung wurde durch die BGR am 22. Oktober 2013 realisiert. Dazu wurde ein BGR-eigener Hubschrauber eingesetzt, an dessen Unterseite sich eine ca. 10 m lange Flugsonde an einem 45 m langen Kabel befindet,

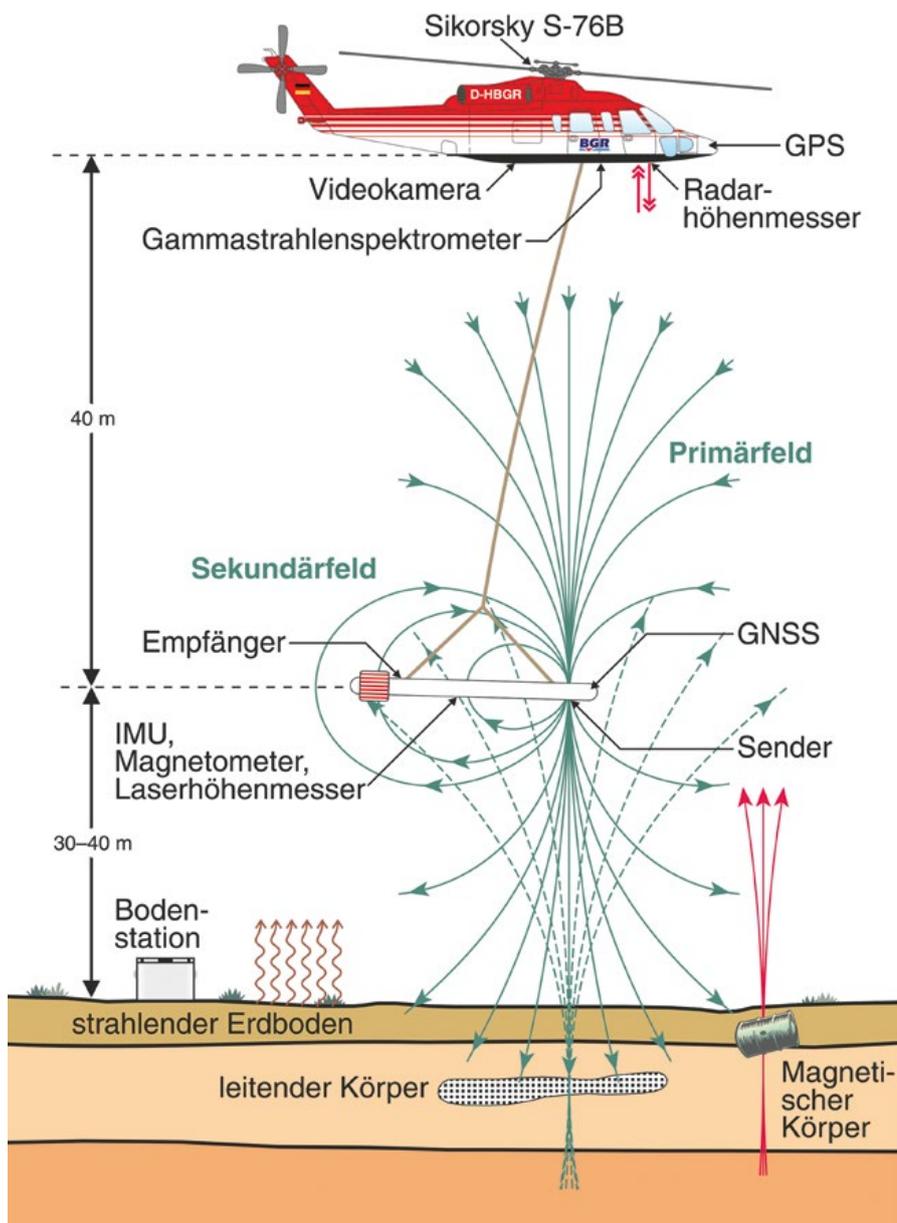


Abb. 2: Prinzipische Skizze des BGR-Hubschraubermesssystems (Quelle: BGR)

die die Sensoren für HEM und HMG sowie für Position und Lage enthält (Abb. 1). Um die Daten aufzunehmen, fliegt dieser Hubschrauber in parallelen Profilen in einer Höhe von ca. 30–50 m über das Aufsuchungsgebiet. Beim HEM-Verfahren werden in sechs Messfrequenzen dipolförmige Magnetfelder (Primärfelder) durch kontinuierliche, sinusförmige Ströme in den Sendespulen generiert (Abb. 2). Je zwei Komponenten der sekundären Magnetfelder, hervorgerufen durch die im Erduntergrund induzierten Ströme, werden für jede Messfrequenz in den Empfängerspulen registriert. Auf Basis von Schichtmodellen für den Erduntergrund werden schließlich aus den aufbereiteten Sekundärfeldern die Größen der spezifischen Widerstände ermittelt (Siemon et al. 2009).

Die aerogeophysikalischen Daten werden zunächst von den Experten der BGR in Hannover aufbereitet und interpretiert. In der Folge sollen lokal bodengestützte sowie hubschraubergestützte zusätzliche transientelektromagnetische (TEM) Daten erhoben werden, die eine weitere Erhöhung der Erkundungstiefe (von etwa 150 m auf 500 m) und eine Verbesserung der Auflösung des geologischen Aufbaus ermöglichen. Beim TEM-Verfahren werden die im Erduntergrund induzierten Ströme durch Ein- und Ausschaltvorgänge in großen Sendespulen erzeugt und die resultierenden Transienten mit kleineren Spulen registriert (Nabighian und Macnae, 1991). Mit ähnlichen Verfahren wie bei der Frequenzbereichs-Elektromagnetik werden ebenfalls einfache elektrische



Abb. 3: (a) Geophone/Kabel/Geode/Laptop (Quelle: MASW); (b) Fallgewicht; (c) Sissy-Impulsquelle (Quelle: Geosym)

Modelle des Untergrunds entwickelt.

Eine vertiefte Aufbereitung der elektromagnetischen Daten und deren nur mit Hilfe von aufwendigen numerischen Verfahren mögliche dreidimensionale Inversion ist Gegenstand von Forschungsaktivitäten an den Instituten Geophysik und Geoinformatik sowie Numerische Mathematik und Optimierung der TU Bergakademie Freiberg (Afanasjew et al., 2013).

Die Aufsuchung wird zusätzlich ergänzt durch bodengestützte reflexions- bzw. refraktionsseismische Messungen, die entlang von ausgewählten Profilen im Aufsuchungsgebiet erhoben werden. Die Messungen und deren Interpretation übernimmt das Institut für Geophysik und Geoinformatik. Diese Flachseismik dürfte eine Auflösung der Schichtenfol-

ge und -struktur im geologischen Untergrund bis in ca. 500 m Tiefe ermöglichen. Dazu werden Geophone im Abstand von ca. 5 m entlang eines Messprofils ausgelegt, mit Kabeln verbunden und über Steuereinheiten (Geoden) zentral zusammengeführt (Abb. 3a). Je nach Zieltiefe kommen insgesamt ca. 240 Geophone (max. Gesamtauslage ca. 1200 m) zum Einsatz.

Als seismische Quelle entlang des Profils dient zum einen ein beschleunigtes Fallgewicht (Abb. 3b), bestehend aus einem schweren Metallbolzen, den man mit einer hydraulischen motorbetriebenen Spannvorrichtung auf eine Metallplatte auf dem Boden beschleunigt. Die gesamte Vorrichtung ist auf einem PKW-Anhänger montiert. Zum anderen kommt eine mit Kartuschen bestückte Impulsquelle (SISSY) zum Einsatz, die in ca. 50 cm tiefen Bohrlöchern rückstandsfrei gezündet wird (Abb. 3c). Sowohl das Fallgewicht als auch die letztgenannte Impulsquelle werden entlang des Profils in bestimmten Abständen (ca. 10 m) zur Generierung von seismischen Wellen eingesetzt, die mit Hilfe der Geophone aufgezeichnet werden. Die Auswertung dieser seismischen Daten

erlaubt eine relativ hochauflösende Abbildung der Untergrundstruktur, insbesondere des Reliefs der Granitoberfläche als primäres Ziel der Messung.

Potenzialbewertung

Die geophysikalischen Informationen und Interpretationen werden schließlich mit den bisherigen Kenntnissen zur Geologie (Oberflächengeologie, Ergebnisse von Tiefenbohrungen) zu einem hochaufgelösten räumlichen Modell des geologischen Untergrunds des Aufsuchungsgebiets „Geyerscher Wald“ integriert. Diese Integration wird durch ein Team von Mitarbeitern des HIF, des LfULG und der TU Bergakademie Freiberg (Institute Mineralogie und Geologie) unterstützt. Basierend auf dem erstellten geologischen Modell sollen dann die Aussagen zum Lagerstättenpotenzial des Untergrunds im Aufsuchungsgebiet präzisiert werden.

Literatur

- Afanasjew, M., Börner, R.-U., Eiermann, M., Ernst, O.G., Spitzer, K. (2013). Efficient Three-Dimensional Time Domain TEM Simulation using Finite Elements, a Nonlocal Boundary Condition, Multigrid and Rational Krylov Subspace Methods, 5th International Symposium

on Three-Dimensional Electromagnetics, May 7-9, 2013, Sapporo, Japan.
 - Baumann, L., Kuschka, E., Seifert, T. (2000). Lagerstätten des Erzgebirges. Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
 - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Aeroelektromagnetik/aeroelektromagnetik_node.html; Stand: 02.07.2013
 - Geosym: <http://geosym.schrattenholz.de>; Stand: 02.07.2013.
 - Multi-channel analysis of surface waves (MASW): <http://multichannelanalysisofsurfacewaves.com/>; Stand 02.07.2013
 - Roscher, O. und Büchner, Ch. (1984): „Ergebnisbericht Pedogeochemie Mittelerzgebirge-Erzgebiet Ehrenfriedersdorf“. Unveröff., Geologisches Archiv LfULG Freiberg.
 - Hösel, G. (unter Mitarbeit von Fritsch, E., Josiger, U., Wolf, P.) (1996) „Das Lagerstättengebiet Geyer-Bergbaumonographie“. Reihe: Bergbau in Sachsen Band 4. Landesamt Umwelt und Geologie und Oberbergamt (Hrsg.), Freiberg.
 - Nabighian, M.N., Macnae, J.C. (1991). Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods. In: Nabighian, M.N., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Application, Part A, Vol. 2, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
 - Siemon, B., Christiansen, A.V., Auken, E. (2009). A Review of Helicopter-borne Electromagnetic Methods for Groundwater Exploration. In: Pellerin, L., Hollinger, K., Slater, L., Yaramanci, Y. (eds.) Hydrogeophysics – Methods and Processes. EAGE Publication BV, ISBN 978-90-73781-75-7, p. 629-646.

„Erzminerale sehen heißt verstehen“ Automatisierte Mineralogie und ihre Anwendung

Bernhard Schulz¹, Jens Gutzmer^{1,2}

Die von der Industrie benötigten Rohstoffe – insbesondere Metalle und Halbmetalle – liegen in der Natur nur selten in einer elementaren und unmittelbar nutzbaren Form vor. Metalle wie beispielsweise Kupfer (Cu), Chrom (Cr) und Platin (Pt) finden sich vielmehr in vielfältigen Verbindungen mit Schwefel (S), Sauerstoff (O) und zahlreichen weiteren Elementen in Erzmineralen wie Chalkopyrit (CuFeS₂), Chromit ((Mg,Fe)Cr₂O₄) oder Braggit (Pt, Pd, Ni)S. Die Erzminerale treten wiederum oftmals in nur geringen Anteilen in Gesteinen oder den Erzen auf.

Die Geometallurgie befasst sich mit den geologisch-mineralogischen Gegebenheiten von Lagerstätten mine-

ralischer Rohstoffe und deren Aufbereitungs-Produkten. Eine wesentliche Aufgabe ist dabei die Charakterisierung der zum Abbau in Frage kommenden Gesteine mit den darin enthaltenen Erzmineralen. Die Eigenschaften aller Minerale, also nicht nur der Erzminerale, sondern auch der mit ihnen assoziierten Gangarten sowie die Art ihrer Einbindung und Verteilung im Gestein bestimmen die technischen Parameter der Gewinnungs-, Zerkleinerungs- und Separationsprozesse. Daher befasst sich die Geometallurgie auch mit dem weiteren Weg der metallhaltigen Minerale durch diese Aufbereitungsstufen bis hin zum Konzentrat (Produkt) und schließlich bis zur Abraumhalde.

Das im Tage- oder Tiefbau gewonnene Erzgestein wird zunächst zerkleinert. Die Frage nach der Korngröße von Erzmineralen und ihren Verwachsungen

mit den anderen Mineralen im Gestein ist dabei für die technische Auslegung und die Betriebsgestaltung von industriellen Brechern oder Mühlen von großer Bedeutung. Der Zerkleinerungsprozess setzt einen sehr großen Energie- und Investitions-Aufwand voraus. Bei einer typischen Tagebau-Mine für porphyrisches Kupfererz fließen beispielsweise bis zu 60 % der insgesamt aufgewendeten Mittel in die Zerkleinerung. Bei diesem großen finanziellen Einsatz ist es offensichtlich von erheblicher Bedeutung zu wissen, ob nach einer Aufmahlung die Erzminerale ausreichend freigelegt (liberiert) und die Korngrößen für weitere Aufbereitungsschritte optimal sind. Für die nachfolgenden Trennungs- und Anreicherungs-Prozesse – zumeist eine Flotation – bedeuten zu kleine Korngrößen oder das Vorhandensein und die Häufigkeit bestimmter Minerale (z.B.

1 Institut für Mineralogie der TU Freiberg, Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

2 Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

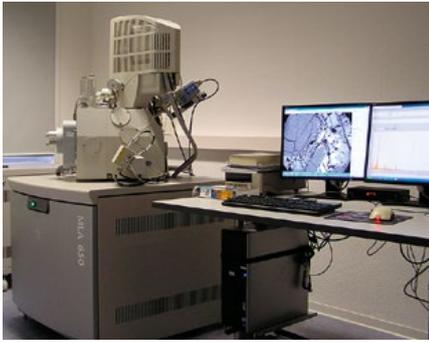


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskop FEI Quanta 650 FEG-MLA. Geometallurgie-Labor der Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie, Institut für Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg

Talk) erhebliche Verluste und Störungen. Der Einsatz chemischer Hilfsmittel bei der Flotation zur Verbesserung der Ausbeute erfordert neben optimal eingestellten Korngrößen und Freilegungsgraden auch eine genaue mineralchemische Phasenbestimmung für die Erzkorn-Oberflächen. Nicht zuletzt liefern auch die Abgänge (Berge) nach einem Erz-Anreicherungsprozess für die Aufbereitungsingenieure wichtige Informationen: Wie viele und welche Erzminerale mit welchen Eigenschaften geraten in welchen Mengen noch in die Abgänge? Wie viele dieser Verluste sind vermeidbar? Wie können die Aufbereitungsprozesse optimiert werden? Bei konstant hohen Aufbereitungskosten ergeben selbst geringfügige Verbesserungen des Ausbringens willkommene Zugewinne an Ressourceneffizienz. Dies bedeutet eine besondere Motivation für die Forscher, die Details von Erzgesteinen und ihrer Aufbereitung zu klären.

Die chemische Analyse eines Gesteins sowie seiner Zerkleinerungs- und Aufbereitungsprodukte liefert nur die elementaren Metallgehalte, z.B. Cu, Cr oder Pt. Dies bringt aber nur wenig Information über die Art und damit die Gewinnbarkeit der Erzminerale, die diese Metallgehalte tragen. Mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie lassen sich Art und Modalanteile von Mineralen relativ genau bestimmen, zumindest bei mehr als einem Gewichtsprozent Anteil einer Mineralart. Sehr viele Erze enthalten jedoch weitaus geringere Anteile an metallführenden Mineralen. Während bei Chromiterzen 50–90 Gew.% des Roherzes aus dem Erzmineral Chromit bestehen, ist dies bei porphyrischen Kupfererzen meist nur 1 Gew.% Chalkopyrit (oder andere Cu- und Cu-Fe-Sulfide), bei Gold- und Platinerzen sogar nur etwa



Abb. 2: Präparate für die automatisierte Mineralogie mit dem Rasterelektronenmikroskop: 1 – Klassische Erzschncliffe aus der Mineralogischen Sammlung der TU Bergakademie Freiberg, 2 – Epoxid-Blöcke mit groben Erzkörnern, 3 – Epoxid-Blöcke mit feinkörnigem Erz aus der Flotation, 4 – Gesteinsproben, z. T. mit Erz, 5 – Gesteins-Dünnschliffe

0,0001 Gew.% an Erzmineralen. Bei niedrigen Gehalten an Erzmineralen ist der Einsatz der Röntgen-Pulverdiffraktometrie daher begrenzt. Weder mittels chemischer Analyse noch via Röntgen-Pulverdiffraktometrie lassen sich Informationen über die Korngrößen, die Zuordnung von Korngrößen zu den Mineralarten und dazu die Freilegungsgrade von Erzmineral-Körnern in komplex zusammengesetzten Erzpartikeln gewinnen. Die kornform- und korngrößenbezogenen Daten von Erzmineral(en) und Gangarten bilden jedoch den Schlüssel für die optimale technische Gestaltung ihrer Zerkleinerung und die danach folgende Wertmineral-Anreicherung.

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) mit Rückstreuelektronen-Detektor (BSE) und einem energiedispersiven Röntgenspektrum-Detektor (EDX) zur Elementbestimmung ist daher das wichtigste Analysen-Instrument in der Geometallurgie (Abb. 1). Mit einer speziellen Software zur Elektronenstrahl-Steuerung lässt sich ein REM mit diesen Detektoren für die automatisierte Mineralogie umrüsten. Die TU Bergakademie hat im Jahr 2010 als erste deutsche Hochschule ein speziell für die automatisierte Mineralogie ausgestattetes REM, einen sog. Mineral Liberation Analyzer (MLA), beschafft und damit das Geometallurgie-Labor der Professur für Lagerstätten-

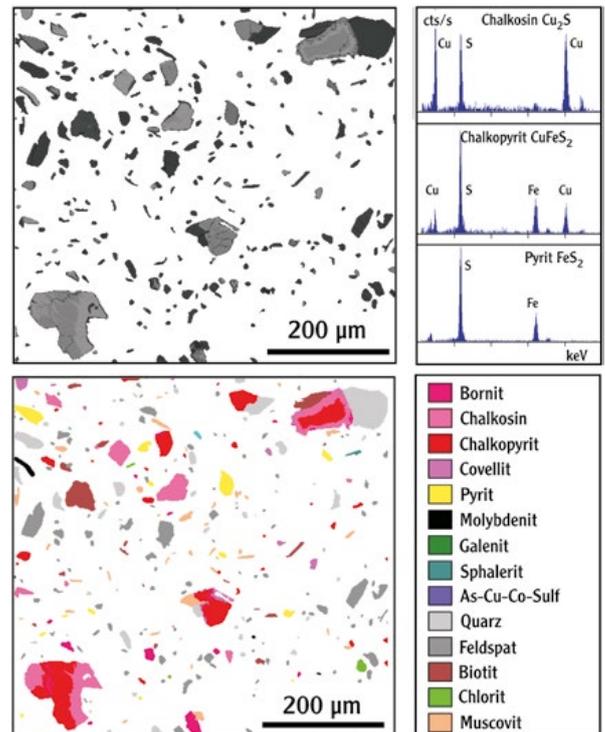


Abb. 3: Rückstreuelektronen-Bild einer Körnerprobe mit EDX-Spektren ausgewählter Mineralkörner. Das Einbettungsmittel Epoxid-Harz ist weiß dargestellt (oben). Mineralogische Klassifizierung des gleichen Aufnahme-fensters (unten). Flotationsprodukt eines porphyrischen Kupfererzes.

tenlehre und Petrologie ausgestattet. Untersucht werden damit Anschliffe, Dünnschliffe sowie in Epoxidharz eingebettete Körnerpräparate mit hochpolierten Oberflächen (Abb. 2). Unter einem Elektronenstrahl zeigen sich im Hochvakuum in einem Rückstreuelektronenbild (BSE) einzelne Partikel in Abhängigkeit von ihrer mittleren Molekülmasse mit unterschiedlichen Grautönen. Erzminerale mit Metallgehalten treten mit hellen Grautönen gegenüber Gangart-Mineralen wie beispielsweise Quarz und Feldspat mit dunklen Grautönen hervor (Abb. 3). Die Bildanalyse-Software richtet nun den Elektronenstrahl für wenige Millisekunden auf jedes mit BSE-Grau-

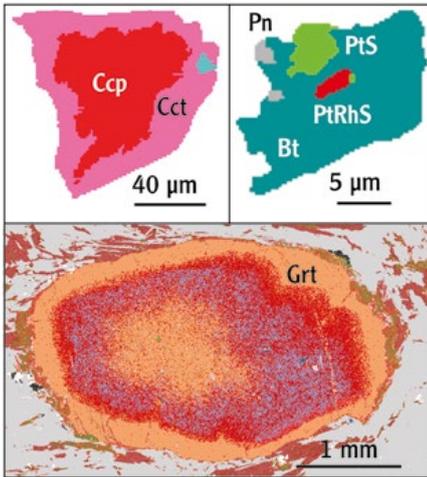
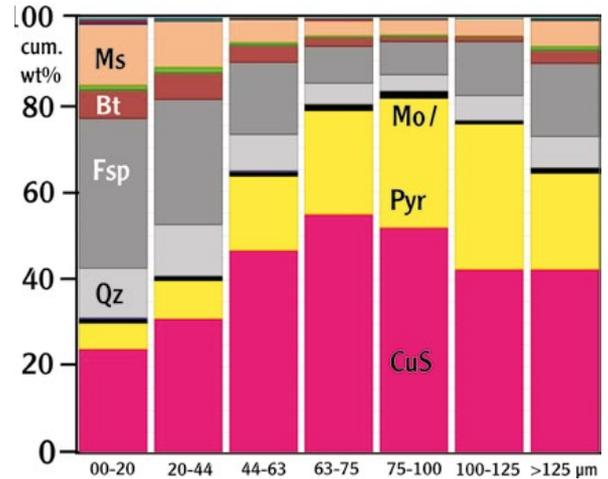


Abb. 4: Analyse einzelner Partikel mit automatisiertem REM: Mineral-Assoziation in einem porphyrischen Kupfererz. Das Cu-Mineral Chalkopyrit (Ccp) wird randlich von Chalkosin (Cct) ersetzt. Verschiedene Platinminerale (PtS, PtRhS) und Pentlandit (Pn) sind in Glimmer (Bt) eingeschlossen (oben). Granat-Korn (Grt) zeigt im Analysenraster mit 100.000 einzelnen EDX-Spektren einen internen chemischen Zonarbau mit variablen Eisen- und Magnesium-Gehalten (unten).

werten abgrenzbare Mineralkorn. Das durch Anregung mit dem Elektronenstrahl erzeugte Röntgenspektrum ist für die Elementarten und -konzentrationen im Mineralkorn charakteristisch. Dies dient der Identifizierung von Körnern innerhalb von Partikeln und ihrer spezifischen Charakterisierung im Zusammenhang mit anhaftenden oder benachbarten Mineralkörnern (Abb. 3 unten; Abb. 4).

Die Steuerungssoftware des REM erlaubt es nun, mit vielfältigen Kombinationen diverser Aufnahmetechniken den speziellen Fragen zu den Erzmineralführenden Partikeln und ihrer Aufbereitung nachzugehen. In einer Körnerprobe eines Kupfererzkonzentrats lassen sich innerhalb von acht Stunden etliche Hunderttausend Partikel ab einer Größe von 1 µm analysieren. Die Einzeldarstellung der Partikel ergibt dabei beispielsweise die Information, dass das Erzmineral Chalkopyrit häufig vom Cu-reicheren Erzmineral Chalkosin ummantelt wird oder dass Platinerzkörner in Glimmer eingeschlossen sind (Abb. 4 oben). Innerhalb eines Kornes lassen sich chemische Variationen detailliert darstellen (Abb. 4, unten). Dies alles erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die komplexe geologische Bildungsgeschichte des Erzes und dessen Verhalten bei der weiteren Aufbereitung. Durch eine Filterung der Partikel-Datensätze lässt sich eine Probe

Abb. 5: Mineral- oder Modalbestände in Produkten der Flotation von porphyrischem Kupfererz. Die Probe wurde mit Datenfiltern in Korngrößenklassen unterteilt („elektronische Siebung“). Dargestellt sind die Anteile an Kupfermineralen (CuS), Pyrit (Pyr), Molybdänit (Mo), Quarz und Feldspat (Qu, Fsp), sowie die Glimmer Biotit (Bt) und Muscovit (Ms).



„elektronisch gesiebt“ in Korngrößenklassen darstellen. Das Ausbringen von Korngrößenklassen mit hohen Anteilen an Kupfererzen als ein wesentliches Ziel der entsprechenden Erzaufbereitungsprozesse kann so mittels des MLA kontrolliert und in seiner Entwicklung verfolgt werden (Abb. 5).

Die absoluten Anteile oder Gehalte eines Minerals in einer Körnerprobe (auch als Modalbestand bezeichnet) sind aber nur ein Aspekt der Partikelanalyse. Für jedes Partikel und dessen einzelne Körner werden auch geometrische Daten zu Umfang, Durchmesser, Radius, Elliptizität und Rundung erfasst. Mit einfachen Korngrößenvergleichen kann man so beispielsweise die Auswirkung von Mahlung und Wiederaufmahlung (Regrinding) von Erzen erfassen und quantifizieren. Im Fall von Chromit in einem Chromiterz ergab sich z. B. eine deutliche Veränderung der Korngrößenverteilung (Abb. 6 oben), die mit einer verbesserten Freilegung großer Chromitkörner einherging. Der MLA bietet auch die in der Analytik einzigartige Möglichkeit, ohne vorhergehende aufwendige Phasenseparation die Korngrößenverteilungen von unterschiedlichen Mineralen in einer Probe zu unterscheiden. So zeigte sich bei einem Kupfererz-Konzentrat, dass infolge der geologische Bildungsprozesse die einzelnen Kupferminerale und der Cu-freie Pyrit ganz unterschiedliche Kornsummenkurven bilden (Abb. 6 unten).

Der Freilegungsgrad von Erzmineralkörnern in den Partikeln eines aufgemahlenen oder bereits weitergehend aufbereiteten Gesteins ist der wichtigste Einzelparameter, den man mittels der MLA bestimmen kann. Man kann ihn je nach chemischen und technischen Anforderungen im Aufbereitungsprozess auf unterschiedliche Weise darstellen.

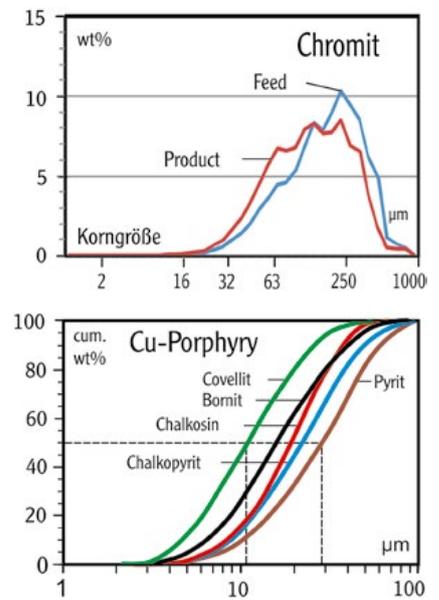


Abb. 6: Korngrößenverteilungen für Chromit in aufbereitetem Chromiterz vor (Feed) und nach (Produkt) einer Wiederaufmahlung in einer Histogramm-Kurve (oben). Nach Erzmineralen getrennte Darstellung der Korngrößen in einem Datensatz aus einer aufbereiteten porphyrischen Kupfererzprobe. Die unterschiedlichen Korngrößen der Kupferminerale sind durch den geologischen Bildungsprozess bedingt (unten).

Bei gravimetrischer und magnetischer Separation ist der Massenanteil des Erzmineralkorns in einem Partikel entscheidend (Abb. 7). Bei Laugungs- oder Flotationsprozessen dagegen kommt es auf den Anteil der freiliegenden Oberfläche der Erzmineralkörner in den Partikeln an. Es werden dazu erst alle Erzmineralführenden Partikel in Liberationsklassen eingeteilt (Abb. 7, Rechtsachse) und dann die Massen aller Erzmineralkörner in der jeweiligen Liberationsklasse addiert und schließlich die Massen aller Liberationsklassen kumuliert (Abb. 7, Hochachse). So ergeben sich Liberationskurven. Damit lassen sich die Endprodukte aus Mahlungs- und anschließenden

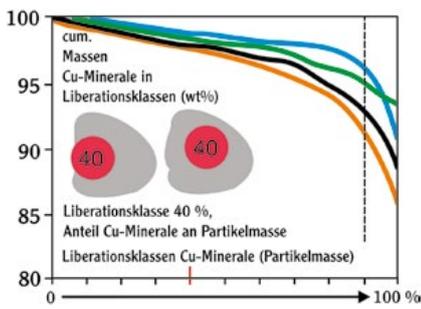


Abb. 7: Vergleichende Darstellung der Freilegung (Liberation) von Kupfermineralen bei technisch verschiedenartig ausgelegten Aufbereitungsprozessen (farbige Kurven). In der Liberation-Klasse 90–100 % mit entsprechend hohem Masseanteil der Kupfermineralen in den Partikeln schneidet der durch die orangefarbene Kurve gekennzeichnete Prozess am schlechtesten ab, in dem durch die blaue Kurve gekennzeichneten Prozess wird deutlich mehr Masse an Kupfermineralen aus den sehr gut liberierten Körnern der Liberation-Klasse 90–100 % gewonnen.

Aufbereitungsprozessen mit unterschiedlichen technischen Parametern oder auch die einzelnen Anreicherungs-schritte innerhalb eines Prozesses vergleichen. Solche Freilegungskurven kann man für alle Mineralarten in einer Probe erstellen.

Mit diesen Möglichkeiten greift die MLA-Anwendung weit über die bisher praktizierte klassische Beobachtung unter einem Lichtmikroskop oder die anderen Verfahren der Festkörper-Partikel-Analyse hinaus. Dies zeigt sich insbesondere bei Gold- oder Platinerzen, in denen die begehrten Minerale in Anteilen von zumeist unter 10 g/t (entspricht 10 ppm) vorliegen. Mit der automatisierten REM-MLA-Analyse lassen sich die bis 1 µm kleinen Gold- oder Platinerzkörner unter vielen Hunderttausend Partikeln rasch und reproduzierbar auffinden und nach ihrer mineralchemischen Zusammensetzung eingruppiert (Abb. 4). So gibt es z. B. weit mehr als 100 Platingruppenelement-Minerale, deren Zusammensetzungen und Wertstoffanteile für die Optimierung der Anreicherungsprozesse bestimmt werden müssen.

Mit ihren vielfältigen Kombinationen von verschiedenen Aufnahmetechniken bietet die MLA also ein beträchtliches Potenzial sowohl für eine betont anwendungsbezogene Forschung im Bereich mineralischer Rohstoffe als auch für die geowissenschaftliche Grundlagen-

forschung. Gesteins-, Erz- und Erzaufbereitungsproben aus zahlreichen im Abbau befindlichen und prospektierten Lagerstätten in aller Welt kamen über die jeweils zugehörige Präparationswerkstatt zur Analyse ins Freiburger Geometallurgie-Labor. Schwerpunkte in der anwendungsorientierten Forschung sind der europäische Kupferschiefer, porphyrische Kupfererze aus Chile, schwedische Eisenerze, Gold- und Platinerze und neuerdings auch Seltenerdelement-Erze unterschiedlicher geologischer Provenienz. Hervorzuheben ist bei diesen angewandten Forschungsarbeiten im Geometallurgie-Labor eine intensive Beteiligung deutscher mittelständischer Technologie-Dienstleistungs- und Beraterfirmen. Die vielfältige Problematik der mineralischen Ressourcen und die steigende Zahl von Projekten auf diesem Feld erfordern eine Erweiterung und Verbesserung der dafür speziell geeigneten Analytik. Im Rahmen der Kooperation mit der Helmholtz-Gesellschaft wird deshalb das Freiburger Geometallurgie-Labor bis Ende 2013 mit drei REM-MLA-Geräten ausgestattet sein.

Lithium-Erkundung in Zinnwald, Osterzgebirge

Jörg Neßler¹, Thomas Seifert¹, Jens Gutzmer², Armin Müller³, Silvio Stute³, Jan Henker³, Kersten Kühn⁴

Einführung

Nach einem beinahe 70-jährigem Stillstand der bergmännischen Tätigkeiten im Revier der Li-Sn-W-Lagerstätte Zinnwald im Osterzgebirge gehen die Erkundungsbemühungen in die nächste Runde. Die Freiburger Firma SolarWorld Solicium GmbH, einhundertprozentige Tochter der SolarWorld AG, erkundet seit der Erteilung der Aufsuchungsgenehmigung durch das Sächsische Oberbergamt im Februar 2011 gemeinsam mit der TU Bergakademie Freiberg und der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Mitteleuropas größtes bekanntes Li-Vorkommen.

1 TU Bergakademie Freiberg
Brennhausgasse 14
09599 Freiberg
joerg.nessler@mineral.tu-freiberg.de

2 Helmholtz Institut Freiberg für
Ressourcentechnologie
Halsbrücker Str. 34
09599 Freiberg

3 SolarWorld Solicium GmbH
Berthelsdorfer Straße 111
09599 Freiberg

4 G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2 · 09633 Halsbrücke



Abb. 1: Lage der Ortschaften Zinnwald und Cínovec an der deutsch-tschechischen Grenze

Historie

Nachdem die über mehrere Jahrhunderte währende bergmännische Gewinnung von Zinn- und Wolframerzen im deutschen Teil der Lagerstätte im Jahr

1933 eingestellt worden war, kam es in den folgenden Jahren bei der Aufarbeitung von Aufbereitungsrückständen (sog. Sandhalden) zur Extraktion des Li-haltigen Glimmers (Zinnwaldit). Wäh-

rend des 2. Weltkriegs war sogar ein kurzzeitiger bergmännischer Gewinnungsbetrieb von Greisenerzen auf Zinnwaldit aktiv. Wurde auf tschechischer Seite der aktive Sn-W-Bergbau noch bis 1991 betrieben, so blieben die Arbeiten im sächsischen Teil der Lagerstätte auf Bergsicherungstätigkeiten sowie Erkundungs- und Forschungsarbeiten in den 1950er-, späten 1970er- und 1980er-Jahren beschränkt. Sie liefern bis heute den Hauptteil der verfügbaren geologischen, mineralogischen, geochemischen, geotechnologischen und hydrogeologischen Informationen, die für die laufenden Erkundungsarbeiten recherchiert, überprüft und bewertet werden müssen.

Lage und Geologie

Die Lagerstätte befindet sich ca. 35 km südlich von Dresden (Abb. 1) und wird von der deutsch-tschechischen Landesgrenze in einen kleineren deutschen (Zinnwald, ca. 1/3) und einen größeren tschechischen Teil (Cínovec, ca. 2/3) geteilt (Abb. 2).

Umgeben von vulkanisch-magmatischen Gesteinen des Altenberg-Teplice-Eruptiv-Komplexes stellt der Zinnwalder Granitkörper eine kleinräumige, granitische Intrusion von elliptischer Form mit einer N-S-Erstreckung von ca. 1.300 m und einer O-W-Ausdehnung von ca. 300 m dar. Das lithologische Profil entwickelt sich zur Teufe hin vom Li-reichen Zinnwaldit-Albitgranit in einen Li-ärmeren Protholithionit-Granit [Štemprock & Šulcek 1969, Rub et al. 1983]. Untergeordnet sind flach fallende Quarzgänge (sog. Flöze), aplitische Ganggesteine sowie porphyrische Varietäten des Albitgranits aufgeschlossen. NO-SW-streichende und beinahe 90° einfallende Störungen (sog. Morgengänge) sind die wesentlichen bruchtektonischen Elemente und weisen subhorizontale Bewegungsrichtungen und geringe vertikale Versetzungen von max. 10 m auf.

Die eigentliche Li-Mineralisation ist an flach lagernde Greisenerzkörper gebunden, die in den Apikalbereichen der Granit-Kleinintrusion von Zinnwald/Cínovec durch den Altbergbau und durch Bohrungen erschlossen wurden. Diese bis zu 20 m mächtigen Greisenzonen sind als flache, linsenförmige und irregulär begrenzte Erzkörper ausgebildet. Sie folgen in ihrem Streichen im Wesentlichen dem Kontakt des Albit-Granits zum umgebenden Teplice-Rhyolit.

Die Greisen verdanken ihre Entstehung einem intensiven Umwandlungsprozess im apikalen Bereich des Zinnwalder Granitstocks als Folge der Intrusion von spät-variszischen granitischen Kleinintrusionen (*small intrusion granites*) und assoziierter magmatischer Fluide, die durch eine hohe Anreicherung von Alkalimetallen, flüchtigen Bestandteilen und inkompatiblen Elementen (z. B. Fluor, Lithium, Rubidium, Cäsium, Zinn, Wolfram, Molybdän) gekennzeichnet sind (cf. Seifert und Kempe 1994). Unter dem Einfluss dieser heißen (vermutlich bis >600 °C) und unter hohem Druck stehenden Fluide (Pneumatolyte) wurden Feldspäte verdrängt und Quarz, Zinnwaldit, Fluorit, Topas und assoziierter Erzminerale neu gebildet.

Der so entstandene Quarz-Glimmer-Greisen besteht im Durchschnitt aus ca. 60 Vol.% Quarz, 30 Vol.% Zinnwaldit, 5 Vol.% Topas sowie wenigen Prozenten an Kaolinit, Fluorit und Eisenoxiden. Akzessorien sind durch Kassiterit, Wolframit, untergeordnet auch Scheelit, Monazit und Columbit-Tantalit repräsentiert. Die durchschnittlichen Gehalte von Haupt- und Spurenelementen sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Untergeordnet treten weitere Greisen-Varietäten innerhalb der Lagerstätte auf, darunter reine Glimmergreisen, Quarzgreisen sowie Quarz-Topas-Greisen.

Tab. 1: Durchschnittliche Gehalte von Haupt- und Spurenelementen des Zinnwalder Quarz-Glimmer-Greisen (anhand von Bohrkernproben der Bohrkampagne von 2012; Probenanzahl = 153, außer Fluor = 17; ppm = parts per million (10.000 ppm = 1 Gew.-%)).

	Einheit	Mittelwert	Variationskoeffizient	Median
Li	ppm	3650	0,36	3540
Sn		770	1,83	210
W		250	2,25	70
Cs		70	0,36	67
Rb		2740	0,34	2760
Nb		91	0,62	86
Ta		41	0,71	36
Sc		17	0,36	16
Pb		32	3,44	15
Zn		240	0,45	225
U		12	0,78	9
Th		42	0,68	36
As		64	0,82	59
SiO ₂	Gew.-%	78,87	0,07	78,70
Al ₂ O ₃		10,32	0,27	10,30
Fe ₂ O ₃		3,00	0,32	2,94
K ₂ O		2,50	0,35	2,43
F		2,85	-	3,08

Zinnwaldit

Das 1845 entdeckte und nach dem Ort seiner Erstbeschreibung benannte Mineral Zinnwaldit gehört zur Gruppe der Schichtsilikate und darin zu den Glimmern. Zu den wesentlichen physikalischen Eigenschaften gehören eine hellgraue bis grüngraue Farbe, eine perfekte Spaltbarkeit, die Mohssche Härte von ca. 3,5, eine Dichte von 2,9 bis 3,0 g/cm³ sowie ein ausgeprägter Paramagnetismus. Neben der relativ hohen Konzentration von Lithium sind erhebliche Anteile von Eisen, Rubidium und Fluor sowie Spuren von Cäsium, Zinn und Zink im Kristallgitter eingebaut.

Zinnwaldit und andere Li-Glimmer wurden auch in anderen vergreisten Graniten im Erzgebirge nachgewiesen, so z. B. in den Sn(-W-Mo-Li)-Lagerstätten Sadisdorf, Altenberg, Schenkenshöhe,

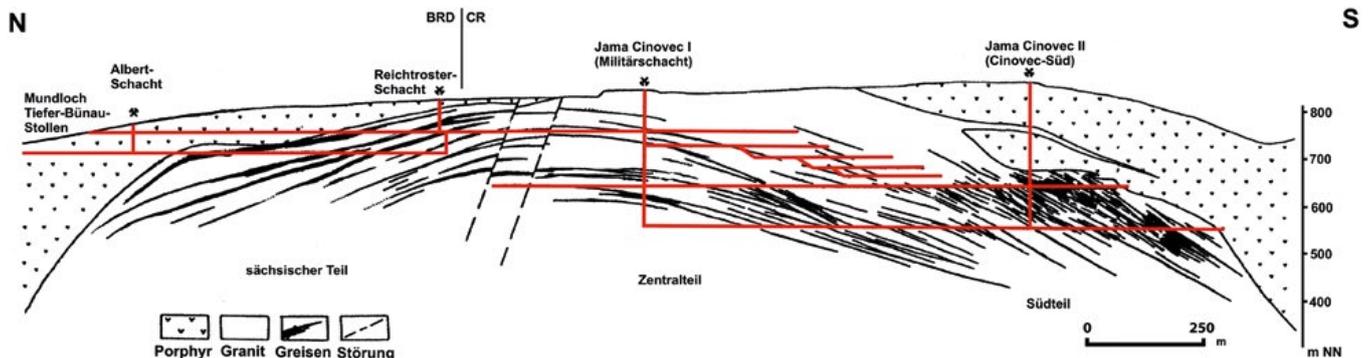


Abb. 2: Schematischer Schnitt durch die Lagerstätte Zinnwald (nach Štemprock et al. 1994; bearbeitet durch Stute, 2013)

Krupka/Graupen und Ehrenfriedersdorf (cf. Baumann et al. 2000). Jedoch liegen hier die gegenwärtig bekannten Vorratsmengen weit unter denen der Lagerstätte Zinnwald/Cínovec.

Erkundung

Den beiden bereits im Jahr 2012 niedergebrachten Bohrungen mit Teufen von 262 bzw. 280 m folgten in der nun abgeschlossenen Bohrkampagne 2013 weitere sieben Bohrungen mit Endteufen zwischen 160 und 370 m.

Doch ist es nicht die eigentliche Suche nach dem oder den Erzkörper(n), welche die Auftraggeber und Bearbeiter des Projekts derzeit umtreibt. Die laufenden Arbeiten haben die Qualifizierung der bekannten und identifizierten Erzmengen zu Reserven zum Ziel, d. h. zu den Mengen des Rohstoffs, die unter gegebenen ökonomischen und technologischen Bedingungen gewonnen und verarbeitet werden können. Dafür werden die aus den Bohrungen abgeleiteten Erkenntnisse in einem 3-D-Lagerstättenmodell zusammengeführt, was die dreidimensionale Darstellung der Lagerungsverhältnisse von Erz und Nebengestein ermöglicht. Zudem werden die aus der geochemischen Analyse der Bohrkernproben ermittelten Elementkonzentrationen innerhalb der verschiedenen Gesteinseinheiten beschrieben und mittels geostatistischer Verfahren im Raum interpoliert. Unter Berücksichtigung strenger internationaler Durchführungs- und Reportstandards wird so die Grundlage für eine Charakterisierung der Lagerstätte geschaffen, die sowohl eine fortführende Bergbauplanung, als auch die Einwerbung von zusätzlichen Finanzmitteln ermöglicht.



Abb. 4: Bohrergerät innerhalb der Ortslage Zinnwald, 2013

Außerdem laufen Forschungsarbeiten am Material der Zinnwalder Lagerstätte, so z. B. zur In-situ-Spurenelementverteilung

in Zinnwalditen in unterschiedlichen Gesteinstypen und Teufen.

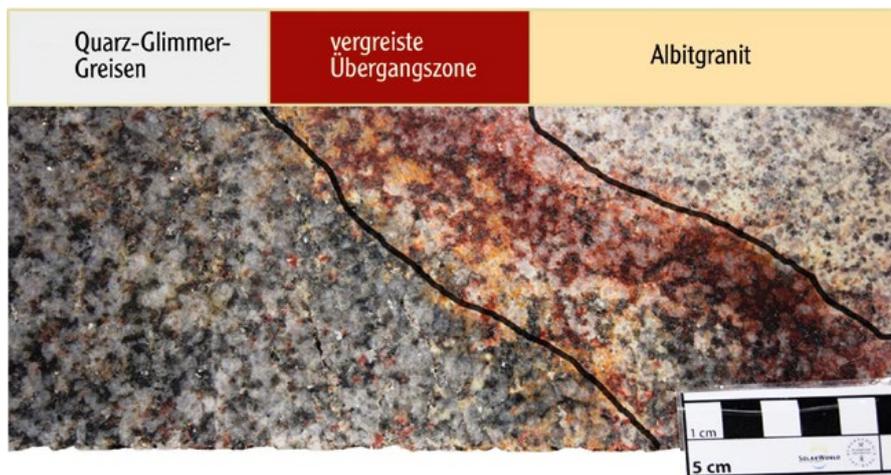


Abb. 3: Kernabschnitt aus der Bohrung ZGLi 01/2012 (Teufe 142,40 bis 142,60 m) mit Kontaktbereich von Quarz-Glimmer-Greisen und Albitgranit

Referenzen

- Baumann, L., Kuschka, E., Seifert, Th. (2000): Lagerstätten des Erzgebirges. Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York: 1-303.
- Rub, M.G., Pavlov, V.A., Rub, A.K., Štemprok, M., Drábek, M., Drábková, E. (1983): Elements of vertical zoning in the Cínovec massif of lithium fluorine granites (Czechoslovakia). In: Correlation of magmatic rocks of Czechoslovakia and some districts of the USSR. Izd. Nauka, 108-137 (in Russian).
- Seifert, Th., Kempe, U. (1994): Zinn-Wolfram-Lagerstätten und spätvariszische Magmatite des Erzgebirges. Beih. z. European Journal of Mineralogy, 6: 125-172.
- Štemprok, M., Šulcek, Z. (1969): Geochemical Profile through an Ore-Bearing Lithium Granite. Economic Geology, 64: 392-404.
- Štemprok, M., Novák, J. K., David, J. (1994): The association between granites and tin-tungsten mineralization in the eastern Krušné hory (Erzgebirge), Czech Republic. Monogr. Series on Mineral Deposits 31: 97-129.

Bergbau im Salzsee

Der Salar de Uyuni in Bolivien ist mit einer Fläche von 10.000 km² auf einer Hochebene von 3.700 m der größte „Salzsee“ (nunmehr ausgetrocknet zur ebenen Salzplatte) der Erde. In den Porenräumen der Salzablagerungen liegt – in Form einer Salzlösung – die weltgrößte Reserve an Lithium (ca. 146 Mill t). Im Rahmen der Partnerschaft zwischen unserer Universität und der Autonomen Universität „Tomas Frias“ in Potosi wurde ein Technologiekonzept für die Gewinnung des Lithiums entwickelt (Ltg. Prof. W. Voigt).

Vor der Lithiumcarbonat-Abscheidung müssen die Fremdsalze – vor allem Mg-, Ca- und K-Verbindungen – abgetrennt werden. Das dazu notwendige schnelle Eindampfen der Salzlösungen unter Einwirkung von Sonne und Wind gelingt effektiv auf dem „Freiberger Kegel“.



Lithium-Gewinnung aus Zinnwaldit

Carsten Pätzold¹, Gunther Martin¹, Matthias Fuhrland², Martin Bertau¹

Lithium ist eines der strategischen Metalle, die essenziell für Zukunftstechnologien sind. Bei seinen Anwendungen stehen vor allem die Elektromobilität sowie dezentrale Energiespeichersysteme für regenerative Energien, insbesondere zur Speicherung von Solarenergie, auf der Basis von Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Blickpunkt des Interesses.

Die erwartete Nachfragesteigerung für Lithium wird sehr unterschiedlich bewertet und reicht von derzeit circa 100.000 t/a bis zu 320.000 t im Jahr 2020. [1] Etwa 75 % der weltweiten Li-Produktion basieren gegenwärtig auf den Salzen aus den Salaren Südamerikas (Chile, Argentinien). Dies wurde in den zurückliegenden Jahren bereits mehrfach unter Bezugnahme auf die intensiven universitären Forschungsaktivitäten am Salar de Uyuni in Bolivien, vor allem durch die Arbeitsgruppe um W. Voigt, thematisiert (Heft 2009, S. 106; Heft 2010, S. 71-75;

Heft 2011, S. 30-33). Die restlichen 25 % verteilen sich auf wenige Rohstoffvorkommen in anderen Ländern der Erde (z. B. Australien). Sie werden außer aus Salaren auch aus lithiumhaltigen Mineralen, wie beispielsweise Spodumen, gewonnen. Die Ungleichverteilung der Ressourcen birgt enorme wirtschaftliche und politische Risiken, wenn einer stark zunehmenden Nachfrage mangelnde bzw. monopolisierbare Kapazitäten gegenüberstehen und Recyclingstrategien noch nicht ausgereift und flächendeckend vorhanden sind. Vor diesem Hintergrund wurde das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt „Hybride Lithiumgewinnung“ durchgeführt. Es hatte zum Ziel, das regional im Grenzgebiet D/CZ bei Zinnwald/Cínovec vorkommende Mineral Zinnwaldit chemisch und verfahrenstechnisch als Lithiumressource zu erschließen. Hierbei handelt es sich um einen Li-Glimmer der Zusammensetzung $\text{KLiFeAl}[(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}](\text{F},\text{OH})_2$ mit einem Li_2O -Anteil zwischen 2,0 und 5,0 Gew.-%. [2,3]

Es galt, geeignete Methoden zu entwickeln, um die kompakte Struktur des Zinnwaldits chemisch aufzuschließen und Lithium in eine lösliche Form zu überführen, um abschließend Lithiumcarbonat zu fällen. Der hybride Verwertungsansatz des Projekts sah zudem eine Integration von lithium- und cobalthaltigen Akkumulatorenrückständen in den Prozess und dessen Optimierung vor.

Der am Institut für Technische Chemie verfolgte Lösungsansatz bestand darin, einen sauren Aufschluss des Zinnwaldits unter Verwendung von Mineralsäuren zu realisieren. Bereits in den 1950er-Jahren ausgeführte ähnliche Untersuchungen mit Schwefelsäure erforderten aber eine Überführung der beim Säureaufschluss gebildeten Aluminium- und Eisensulfate in unlösliche Oxide bei 800–850 °C. Der damit verbundene hohe energetische Aufwand sollte vermieden werden, indem der Zinnwaldit mit Salzsäure aufgeschlossen wurde. Neben Salz- und Schwefelsäure kamen aber auch Salpeter- und Essigsäure test-

- 1 Institut für Technische Chemie, TU Bergakademie Freiberg
2 SAXEED, TU Bergakademie Freiberg

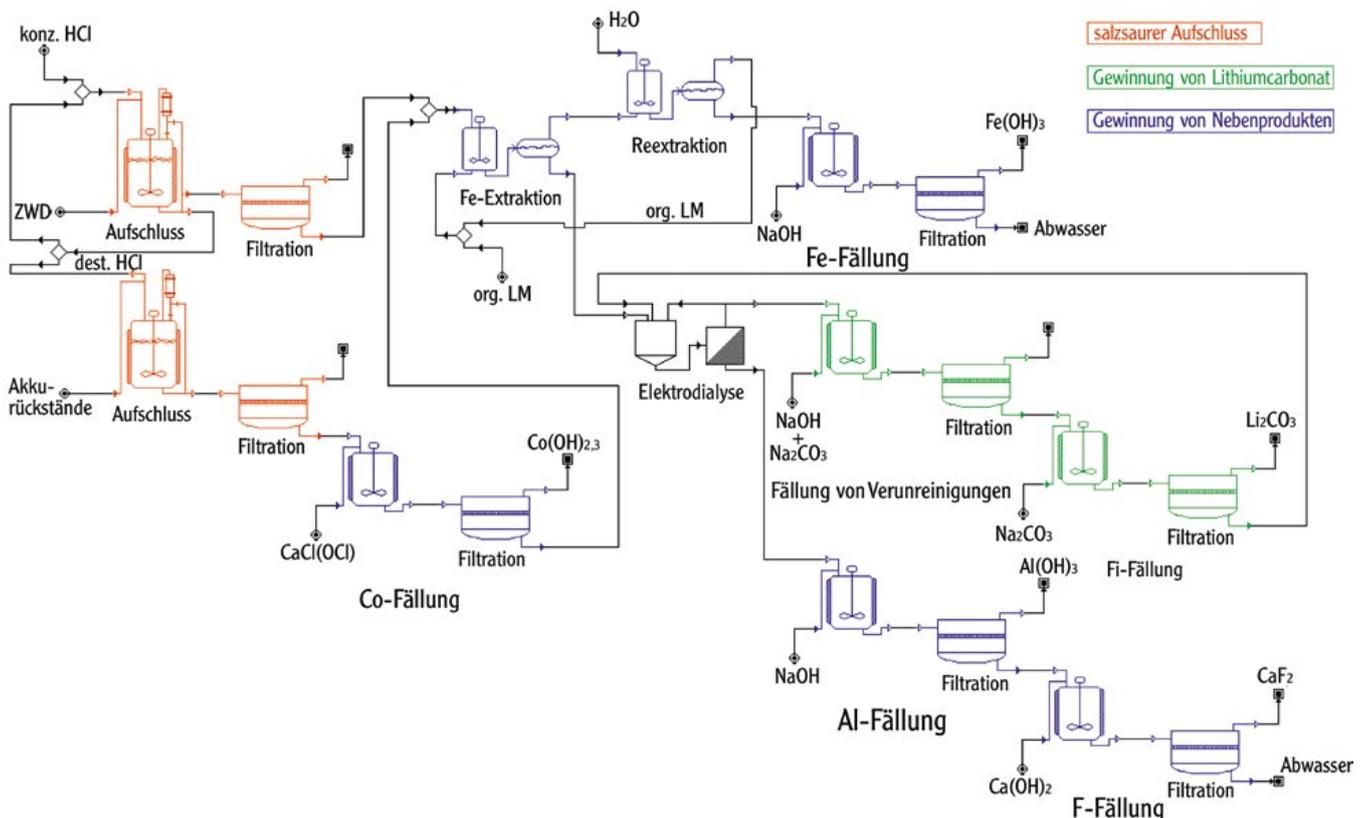


Abb. 1: Verfahrensfließbild der Li-Gewinnung aus Zinnwaldit

weise zum Einsatz. Hintergrund der Verwendung von Essigsäure war, dass Zinnwaldit als fluorhaltiger Glimmer mit starken Säuren Fluorwasserstoff freisetzen könnte. Thermogravimetrische Untersuchungen zeigten jedoch ein sehr unterschiedliches Verhalten gegenüber Säuren. Bei Verwendung von Salzsäure wurde kein Fluorwasserstoff freigesetzt und der Glimmer trotzdem in kurzer Zeit aufgeschlossen, weshalb sich diese Mineralsäure für den sauren Aufschluss besonders empfiehlt. Fluor blieb vollständig als Fluorid in der Lösung enthalten, was gerade in Hinblick auf eine integrierte Rohstoffverwertung attraktiv ist.

Der Aufschlussprozess wurde hinsichtlich Säurekonzentration, -menge und Reaktionstemperatur optimiert. Da für eine ausreichend hohe Aufschlussrate ein dreifacher Säureüberschuss erforderlich ist, wurde zur Erhöhung der Prozessökonomie neben dem Aufschluss unter Normaldruck in Standardglasapparaturen auch eine Rückführung unverbrauchter Säure realisiert. Ein Teil dieser Regeneratsäure kann direkt zum vollständigen Aufschluss der Akkumulatorenrückstände verwendet werden. Dieser Sekundärrohstoff lässt sich somit problemlos in den Gesamtprozess integrieren (Abb. 1).

Um aus der Aufschlusslösung handelsfähiges Lithiumcarbonat zu erhalten, mussten insbesondere die hohen Eisen- und Aluminiumanteile abgetrennt werden. Die hierzu installierte Prozesskette umfasste daher eine Eisenextraktion, einen Elektrodialyseschnitt sowie Fällungen von $\text{Al}(\text{OH})_3$, CaF_2 und abschließend von Li_2CO_3 . Zuerst muss Eisen entfernt werden, da es bereits im pH-Wert-Bereich von 2 bis 3 zur Fällung von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und später von $\text{Al}(\text{OH})_3$, begleitet von Li-Verlusten, kommt. Die Elektrodialyse mit monoselektiven Membranen führt zur Separierung von Al^{3+} und F^- , die als $\text{Al}(\text{OH})_3$ bzw. CaF_2 gefällt werden können, sowie von Li^+ -Ionen, die sich im Konzentrationskreislauf der Elektrodialyse befinden. Die Elektrodialyse bewirkt neben der Abtrennung zugleich auch eine Aufkonzentrierung der Li^+ -Ionen. Nach dem Entfernen von Verunreinigungen – einem Reinigungsschritt, der sich aus Wirtschaftlichkeitsgründen am Verfahren mit Spodumen orientiert – erfolgt die abschließende Fällung von Li_2CO_3 mittels Soda. Optional kann ein Umkristallisationsschritt angeschlossen werden, um anhaftendes NaCl zu entfernen. Durch Optimierung des aufwändigeren Schritts der Eisenextraktion wurde das Verfahren deutlich vereinfacht, der ab-

trennbare Eisenanteil maximiert und somit die Kosten auf 4 €/kg Li_2CO_3 (vgl. Marktpreis: ~5 €/kg) gesenkt. Auch eine Möglichkeit der Abtrennung von Kaliumsalz wäre wirtschaftlich hochinteressant. Die in Vorexperimenten versuchte innovative Direktcarbonatisierung von Li^+ mittels überkritischem CO_2 verlief hingegen nur unvollständig, sodass dieser Weg ökonomisch nicht gangbar war.

Als Fazit der Versuche zu diesem Forschungsgegenstand ergibt sich: Der saure Aufschluss erweist sich als leistungsfähige Alternative zur klassischen Pyrometallurgie.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens (FKZ 03WKP18A).

Literatur

- 1 J. S. Lavallée, „Lithium: A Critical Element“, abrufbar unter http://www.machinecontrolonline.com/PDF/MachineControlMagazine_Lavallee-LithiumACriticalElement_Vol3No1.pdf, 2013.
- 2 J. Deberitz, Lithium. Production and application of a fascinating and versatile element, Verlag Moderne Industrie, München, 2006.
- 3 J. Jandová, H. N. Vu, T. Belková, P. Dvořák, J. Kondás, Ceramics – Silikáty 2009, 53, 108–112.

Erschließung der Lagerstätte Niederschlag und Aufbereitung von Flussspat

Wolfgang Schilka

Vorbemerkungen

Seit dem Ansteigen der Rohstoffpreise zur Jahrtausendwende erinnern sich die Rohstoffexperten auch wieder an die erzgebirgischen Lagerstätten. Zu den ersten aktiven Fachleuten gehörte Dr. Horst Richter mit der Firma G.E.O.S. Freiberg, der im November 2007 den Bergbaubetrieb Erzgebirgische Fluss- und Schwespatcompagnie GEOS GmbH gründete – mit der Maßgabe, die Lagerstätte Niederschlag neu aufzuschließen.

In der Altbergbaulagerstätte Niederschlag wurden 1865 die Gewinnungsarbeiten auf Kobalt- und Silbererze eingestellt. Eine kurze, aber heftige, von der SAG Wismut verantwortete Bergbauperiode von 1949 bis 1954 – auf Uranerz zielend – brachte den Nachweis,

dass auf deutschem Territorium der in den 1930er-Jahren auf tschechischem Staatsgebiet entdeckte Spatgang in Niederschlag ebenfalls anzutreffen ist. Von 1955 bis 1960 schloss sich eine bergmännische Erkundung bis 554 m NHN auf vier Sohlen durch den VEB Zinn- und Spatgruben Ehrenfriedersdorf an. Es gelang damals nicht, eine der Lagerstätte angepasste Aufbereitungstechnologie zu entwickeln. Einen deutlichen Vorratszuwachs erfuhr die Lagerstätte Niederschlag in der Bohrexplorationsphase von 1972–1978. Die Ergebnisse der beiden Erkundungsetappen waren die Grundlage für die Neuaufnahme der Untersuchung der Lagerstätte im Herbst 2007.

Nach einer Phase der Planung des Vorhabens und der Einholung erster Ge-

nehmigungen beim Sächsischen Oberbergamt wurde im Mai 2009 der ehemalige Wismutstollen 215 geöffnet und bis zum Verbruchbereich auf 220 m Länge rekonstruiert.

Geologischer Bau der Lagerstätte

Zum geologischen Bau der Lagerstätte Niederschlag sind durch KUSCHKA (2002) und BAUMANN, KUSCHKA & SEIFERT (2000) nach wie vor aktuelle Arbeiten vorgelegt worden: Es handelt sich um eine typische, hydrothermal entstandene Ganglagerstätte mit den zwei parallelen Spatgängen Magistralnaja und Kariernaja. Die Längserstreckung der beiden Gänge beträgt – einschließlich ihrer Fortsetzung auf tschechischem Territorium – ca. 3,5 km. Die erkundete

Teufenerstreckung reicht bis zu 850 m. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Spatmineralisation beträgt 3,5 m. Lagerstättentypisch ist das gehäufte Auftreten von Nebengesteinszwischenmitteln im mineralisierten Gangbereich. Beim Auftreten des subvulkanischen Phonoliths erfolgte eine völlige Resorption der Spatmineralisation. Der gangförmig vorkommende Phonolith ist Bestandteil des miozänen Maars von Hammerunterwiesenthal.

Die vorherrschenden Nebengesteine der Spatmineralisation sind kambrische Muskovit-Biotit-Paragneise und Muskovitglimmerschiefer, die sich bisher für die gewählten bergmännischen Auffahrungsprofile als hinreichend standfest erwiesen haben. Das Alter der Spatmineralisation wird dem des jurassischen saxonischen Mineralisationszyklus' zugeordnet.

Die beiden Spatgänge unterscheiden sich in ihrer Mineralisation darin, dass der Magistralnaja eine vorherrschende Quarz-Fluorit-Füllung besitzt, der Kariernaja vor allem aber Baryt-Hämatit führt. Zudem tritt bei den Gängen eine sulfidbetonte Nachphase mit Chalkopyrit, Galenit, Sphalerit und Pyrit auf. Grundsätzlich löst die Spatmineralisation die in den oberen 80 m der Lagerstätte Niederschlag auftretenden Paragenesen mit Dolomit-Pechblende bzw. Wismut-Kobalt-Nickel-Uranvererzung vollständig ab. Kontrolliert wurde im Hangenden der Lagerstätte die Uranvererzung aus der Kreuzung der hydrothermalen Gangstrukturen mit prämetamorph angelegten s-flächenkonformen, tektonischen Bewegungsbahnen, den sog. Schwarzen Flözen, die im liegenden Lagerstättenabschnitt der Spatmineralisation nicht mehr gefunden werden konnten. Nach KUSCHKA (2002) betragen die Rohspatvorräte mehr als 3,3 Mio t im deutschen Lagerstättenanteil. Weitere 2,1 Mio t Rohspat wurden nach USTAV PRO VYZKUM RUD (1990) im tschechischen Lagerstättenabschnitt nachgewiesen.

Bergmännischer Aufschluss der Lagerstätte

Der bergmännische Aufschluss der Lagerstätte Niederschlag begann im September 2010 mit dem Stellen des Vortunnels für das Rampenmundloch. Die Rampe dient als Ausrichtungsbauwerk für alle weiteren Grubenbaue. Mit ihr sind aufgeschlossen: die Zugänge zum alten Schacht 281 mit der Hauptwasser-



Fotos (4): Wolfgang Schilka

Abb. 1: Spatgang Kariernaja mit Baryt- und Fluoritmineralisation auf der 743-m-Sohle

haltung, zum Wismutblindschacht 328 mit der zentralen Wetterführung, zum Sprengmittellager, zur Trafostation, zur untertägigen Aufbereitungsanlage sowie zu den Teilsohlen für den Gewinnungsbetrieb. Außerdem besteht die Möglichkeit, über die Rampe bei Bedarf Zugang zum historischen Grubenfeld des Wismutbergbaus zu erlangen.

Die Rampe ist auf 210 m Länge als horizontale Geradrampe in der Achse des ehemaligen Wismutstollens 215 aufgeföhren. Danach ist sie weitere 300 m mit 11 % Gefälle bis zur Teufe 734 m NHN aufgeschlossen worden. Auf diesem Niveau ist die bereits genannte Infrastruktur des Grubenbetriebs angesiedelt. Im Liegenden der 734-m-Sohle schließen sich drei Gewinnungsblöcke mit jeweils 60 m Sohlenabstand an, die durch eine Wendel Anschluss an die Geradrampe

besitzen. Der gesamte Ausrichtungsbau ist als dauerstandfester Grubenbau mit Ankerbau, Mattenverzug und Spritzbeton sowie Fahrbahnbeton errichtet worden. Das Profil der Rampe ist bis zum Bereich der untertägigen Aufbereitungsanlage mit straßenzugelassenen LKW befahrbar. Unmittelbar vor dem Abzweig zur 734-m-Sohle ist eine Wendeschleife für die LKW aufgeföhren. Hier befindet sich auch die Kippstelle für die Flotationsberge, die als Versatzmaterial von der Aufbereitung Aue in das Bergwerk zurückgeföhrt werden. Über die 734-m-Sohle (die ehemalige 1. Sohle des Uranerzbergbaus) besteht zwischen Rampe und Blindschacht 328 eine direkte Verbindung, die als Hauptwetter- und Fluchtweg genutzt wird. Zugang zum Spatgang besteht auf der 743-m-Sohle und auf der 734-m-Sohle. Weitere Ge-



Abb. 2: Fahrschauellader ST7 im Christiane-Stollen



Abb. 3: Aufbereitungsanlage untertage in Niederschlag

winnungsorte werden von der Wendel aus aufgeschlossen.

Die technische bergmännische Ausrüstung der Grube besteht momentan aus drei Fahrschaufelladern, zwei elektrohydraulischen Bohrwagen, einem Muldenkipper mit 15 t Nutzlast und einem Teleskopschwenklader.

Zur bergbaulichen Infrastruktur des Grubenbetriebes gehört der Wasserhaltungsschacht 281, der mit zwei Pumpen ausgestattet ist. Die gehobenen Grubenwässer werden in das Grenzgewässer Pöhlbach eingeleitet. Der Wetterschacht 328 erhält die Frischwetter über den 240 m langen Christiane-Stollen (ehemaliger Stollen 216 der SDAG Wismut).

Nach Abschluss der Aus- und Vorrichtung werden die anfallenden Berge des weiteren Grubenaufschlusses in den Gewinnungshohlräumen als Versatz eingebaut, sodass eine übertägige Haldenwirtschaft entfällt.

Übertage wurde neben dem Rampenmundloch ein kombiniertes Werkstatt-

und Kauengebäude errichtet, das auch der offizielle Sitz der Firma im Kurort Oberwiesenthal ist.

Vorzerkleinerung und Sortieranlage untertage

Die erste Verarbeitungsstufe für den Rohspat befindet sich untertage ca. 500 m vom Rampenmundloch entfernt. In zwei Kavernen von 6 m Breite und bis zu 12 m Höhe befinden sich die folgenden Aufbereitungsmaschinen:

- Einschwingen-Backenbrecher
- Magnetabscheider
- Kreisschwingsiebanlage
- Röntgensortieranlage
- Kegelbrecher
- Zwischenbunker und Endproduktsilo
- zwei Steuerungscontainer
- Entstaubung
- diverse Bandanlagen

Das gesprengte Haufwerk wird unklasiert mittels Schauelfahrlader bzw. Muldenkipper dem Backenbrecher zugeführt. Der gebrochene Rohspat von

maximal 60 mm Korngröße wird dosiert dem Mehrdecksieb aufgegeben. Hier entstehen vier Fraktionen. Das Überkorn gelangt erneut in den Backenbrecher. Die Fraktion 10 bis 60 mm wird in zwei Korngrößenbereiche von 10 bis 30 und 30 bis 60 mm aufgeteilt und der Sortiermaschine zugeführt. Mittels Röntgensortierung werden spatfreie Nebenbestandteile aus dem Materialfluss aussortiert und in einer Bergekammer magaziniert. Das Unterkorn < 10 mm wird mit Bandanlagen direkt dem Verladesilo zugeführt.

Das mit Spat angereicherte Zwischenprodukt wird in einem Kegelbrecher auf < 15 mm zerkleinert und im Verladesilo für den Versand nach Aue deponiert.

Die Anlage wird aus zwei Containern gesteuert. Die Röntgensortierung besitzt eine separate Schaltung mit eigenem Container.

Mahlungs- und Flotationsanlage Aue

Die zweite Aufbereitungsstufe für den Rohspat befindet sich auf dem Betriebsgelände der Nickelhütte Aue GmbH. Für die Errichtung der Mahlungs- und Flotationsanlage wurde das stillgelegte Gelände mit dem darauf befindlichen Gebäude des ehemaligen Rohbraunkohleheizhauses angemietet. Das aus der Grube Niederschlag antransportierte Rohhaufwerk wird mit einer Korngröße 0 bis 15 mm in einem 300-t-Vorratssilo gebunkert und von da aus auf die Mühlen gegeben.

Die Kugelmühle arbeitet im Kreislauf mit einer einstufigen Hydrozyklonanlage und gewährleistet eine Aufmahlung auf < 160 µm. In der nächsten, mehrstufigen Hydrozyklonanlage wird der für die nachfolgende Flotation störende Anteil mit Korngrößen < 10 µm abgetrennt. Diesem Schlamm wird anschließend das Prozesswasser entzogen.

Gemeinsam mit den Bergen der Flotationsanlage gelangen die entwässerten Aufbereitungsabgänge per LKW zurück in die Grube Niederschlag, wo sie als Versatz eingebaut werden. Das entschlammte Rohspatmaterial 10 bis 160 µm gelangt nun in die Flotationsanlage. In der ersten Stufe erfolgt die Sulfidflotation, um die in der Lagerstätte vorkommenden sulfidischen Minerale, wie Chalkopyrit, Galenit und Pyrit aus dem Spatprodukt zu entfernen. (Das Sulfidkonzentrat ist ein Verkaufsprodukt.) Es schließt sich eine Spat-Kollektivflotation an, aus der nacheinander nach dem Durchlaufen der Grund- und Nachreinigungsflota-



Abb. 4: Blick auf die Flotationsanlage am Standort Aue

tion als Wertprodukte Säurespat (Flusspatkonzentrat >97,5 % Spatinhalt) und Barytkonzentrat (Schwerspatkonzentrat >95 % Spatinhalt) abgeschieden werden. Die tägliche Durchsatzleistung der Flotationsanlage beträgt 700 t Rohspat.

Mit dem Umbau des ehemaligen Rohbraunkohleheizhauses entstand auch ein Werkstatt-, Sanitär- und Bürotrakt. Für die Fertigprodukte wurde eine separate Konzentrathalle als Neubau errichtet. Insgesamt sind an den Standorten Niederschlag und Aue moderne Anlagen des Kleinbergbaus und der Aufbereitung entstanden.

Mit der Vermeidung von Haldenschüttungen und der Nachnutzung einer stillgelegten Industriebrache wurden ökologische Aspekte bei der Planung und Umsetzung der bergbaulichen Anlagen berücksichtigt.

Literatur und unveröffentlichte Berichte

- Baumann, L.; Kuschka, E.; Seifert, T.; (2000): Lagerstätten des Erzgebirges, Enke im Georg Thieme Verlag Stuttgart, 300 Seiten
- EFS GmbH (2011): Hauptbetriebsplan 2012 – 2013 Fluss- und Schwerspatgrube Niederschlag, Kurort Oberwiesenthal, Erzgebirgskreis vom 28.11.2011, unveröffentlichter Bericht
- Kuschka, E. (2002): Die Uranerz-Baryt-Fluorit-Lagerstätte Niederschlag bei Bärenstein und benachbarte Erzvorkommen, Bergbaumonografie. - In: Bergbau in Sachsen, Band 6 - Landesamt für Umwelt und Geologie, Oberbergamt Freistaat Sachsen (Hrsg.), 283 Seiten, Freiberg
- Ustav pro vyzkum rud (1990): Upravitelnost fluorit-barytovo suroviny z lokality Vykmanov a poloprovozni overeni technologickeho postupu, GEOFOND-Dokument, Nr. FZ 6325/335, Mnisek pod Brdy

Mathematische Modelle der Höffigkeitsprognose

Helmut Schaeben¹

Gegenstand des *Potential Modelling* oder *Targetting* ist es, Orte zu erkennen, für die die Wahrscheinlichkeit eines wohldefinierten ortsabhängigen Ereignisses, beispielsweise die Vererzung eines bestimmten Typs, ein relatives Maximum annimmt, das heißt größer ist als an unmittelbar benachbarten Orten. Im Falle der Vorhersage der Wahrscheinlichkeit einer bestimmten ortsabhängigen Vererzung spricht man auch von Höffigkeitsprognose.

Lagerstättenmodelle

Die erste fundamentale Voraussetzung für derartige Prognosen ist ein hinreichendes Verständnis der Ursachen der zu prognostizierenden Vererzung bzw. der Genese von Lagerstätten eines bestimmten Typs. Entsprechende konzeptionelle Faktorenmodelle der Lagerstätten-genese werden in (Cox und Singer, 1986) beschrieben.

Ein zutreffendes Faktorenmodell kann als Grundlage von Regressionsmodellen angewendet werden, indem die konzeptionellen Faktoren als ortsabhängige Prädiktoren eingesetzt werden, die für das Eintreten der zu prognostizierenden ortsabhängigen Vererzung günstig oder ungünstig sind. Sie stellen dann „notwendige“ bzw. „hinreichende“ Abhängigkeiten zwischen dem ortsabhängigen binären Zielereignis $T(x)$ der Anwesenheit der Vererzung bzw. eines entsprechenden Lagerstättentyps am Ort $x \in D \subset \mathbb{R}^3$ und den ortsabhängigen Prädiktoren $B_0(x), \dots, B_m(x)$ her. Das Zielereignis wird durch eine binäre Zufallsvariable $T(x)$ so beschrieben, dass $T(x) = 1$ die Anwesenheit und $T(x) = 0$ die Abwesenheit der Vererzung am Ort x anzeigt. Die Prädiktoren $B_\ell(x)$, $\ell = 1, \dots, m$ können zunächst diskret, d. h. binär oder kategoriell, oder kontinuierlich sein; dabei ist $B_0(x) \equiv 1$.

Dann bedarf es mathematischer Modelle und ihrer numerischen Realisierungen, um beschreibende Lagerstättenmodelle zur quantitativen Höffigkeitsprognose anwenden zu können

(Singer und Menzie, 2010). Ein Modell $\mathcal{M}(\theta | \mathbf{B}, T)$ berücksichtigt die Prädiktoren $\mathbf{B}(x) = (B_0(x), \dots, B_m(x))^T$, indem es ihnen Gewichte $\theta = (\theta_0, \dots, \theta_m)^T$ zuordnet, die vermittels einer nicht-linearen Funktion \mathcal{F} ein Maß für die Abhängigkeit der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(T(x) = 1 | \mathbf{B}(x))$ der Vererzung $T(x)$ bei gegebenen Prädiktoren $\mathbf{B}(x)$ sind, d. h.

$$P(T(x) = 1 | \mathbf{B}(x)) = \mathcal{F}(\theta | \mathbf{B}(x)).$$

Im Unterschied zur Matheron'schen Geostatistik (*Variogramm, Kriging*) werden räumlich induzierte Abhängigkeiten der Vererzungsereignisse oder der Prädiktoren hier nicht berücksichtigt.

Modelle lassen sich mit Hilfe der *Bayes'schen Formel* der Wahrscheinlichkeitstheorie als klassische *logistische Regressionsmodelle*, als *künstliche neuronale Netze*, mit Begriffen des *statistischen Lernens* wie der *support vector machines* und anderen formulieren. Alle bekannteren mathematischen Modelle der Potenzial-Prognose sind unabhängig von der räumlichen Dimension, d. h. die Orte können beispielsweise entlang einer 1-dimensionalen Bohrung, in einem 2-dimensionalen Flächenstück oder in einem 3-dimensionalen Volumenelement angesiedelt sein.

Alle bekannten Modelle benötigen zur Schätzung der jeweiligen Modellparameter ein Trainingsgebiet $D' \subset D$, das als gut erkundet gelten kann. In der Praxis der Höffigkeitsprognose sind die Trainingsgebiete die materiellen Träger der Daten $(b_1(x_i), \dots, b_m(x_i))^T = \mathbf{b}(x_i)$ und $t(x_i)$, $x_i \in D'$, $i = 1, \dots, n$, die die Prädiktoren $B_1(x_i), \dots, B_m(x_i)$ und die Zielgröße $T(x_i)$ so belegen, dass ein konkretes Modell $\mathcal{M}(\hat{\theta} | \mathbf{b}(x_i), x_i \in D', i = 1, \dots, n)$ konstruiert werden kann. Das konkrete Modell ermöglicht zunächst die numerische Schätzung $\hat{\theta}$ der unbekannt Parameter θ und dann die der bedingten Wahrscheinlichkeit $\hat{P}(T(x) = 1 | \mathbf{B}(x) = \mathbf{b}(x))$.

Gewöhnlich werden *Trainingsgebiete* in elementare Zellen, 1-dimensionale Intervalle, 2-dimensionale ebene Kartenbild-Elemente (pixel) oder 3-dimensionale volumenhafte Modell-Elemente

¹ Mathematische Geologie und Geoinformatik, Institut für Geophysik und Geoinformatik, TU Bergakademie Freiberg

(voxel), zerlegt, denen die Daten zugeordnet werden. Die zweite fundamentale Voraussetzung für Höffigkeitsprognosen ist die Verfügbarkeit eines Geomodells, d. h. eines digitalen 2d-Kartenbilds oder eines digitalen 3d-Voxel-Geomodells. Jeder Zelle des Modells des Trainingsgebiets sind die als bekannt vorausgesetzte Anwesenheit/Abwesenheit der Zielgröße Vererzung und Anwesenheit/Abwesenheit bzw. Werte der Prädiktoren zugeordnet; jeder Zelle im Untersuchungsgebiet sind die aus dem Modell bekannte Anwesenheit/Abwesenheit bzw. Werte der Prädiktoren zugeordnet.

Alle Modelle setzen eine solide, von Sachverstand geleitete statistische Datenanalyse voraus, beispielsweise, um sukzessive ein multiples logistisches Regressionsmodell oder ein multiples *weights of evidence*-Modell zu konstruieren oder ein künstliches neuronales Netz zu konfigurieren. Abgesehen von der Verfügbarkeit bzw. Bereitstellung konsistenter Geodaten bzw. eines autorisierten Geomodells, dessen Existenz impliziert, dass die zugrundeliegenden Modelldaten konsistent sind, ist die Datenanalyse als Vorbereitung zur Formulierung des Vorhersagemodells der zeitaufwändigste Arbeitsschritt. Ergebnis der Datenanalyse ist die Auswahl der im Prognosemodell zu berücksichtigenden Prädiktoren, z. B. bezüglich *weights of evidence* hinsichtlich der Modellannahme der bedingten Unabhängigkeit, bezüglich logistischer Regression hinsichtlich der Signifikanz der Modellparameter, etc.

In der Praxis wird das wohlerkundete Gebiet, das sich im Prinzip als Trainingsgebiet eignet, häufig in ein (größeres) tatsächliches Trainingsgebiet und ein (kleineres) *Validierungsgebiet*, die disjunkt sind, aufgeteilt. Nach der Anpassung eines Modells an die Daten des Trainingsgebiets wird das Modell validiert, indem überprüft wird, ob das angepasste Modell die Daten im Validierungsgebiet hinreichend gut reproduziert. Nach erfolgreicher Validierung wird das angepasste Modell, d. h. das Modell mit entsprechend den Daten des Trainingsgebietes angepassten Parametern, zur Höffigkeitsprognose auf weniger erkundete Untersuchungsgebiete mit hinreichend ähnlichen lagerstättenkundlichen Charakteristiken übertragen. Zur numerischen Realisierung des angepassten Modells müssen die Prädiktoren im Untersuchungsgebiet mit Daten belegt sein.

Nach einer kurzen Diskussion der mathematischen Modellannahme der bedingten Unabhängigkeit werden hier im Weiteren drei häufig angewendete Modelle und entsprechende Methoden zur Schätzung der bedingten Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses unter Berücksichtigung der begünstigenden bzw. verhindernden Prädiktoren vorgestellt, nämlich *weights of evidence*, *logistische Regression* und *künstliche neuronale Netze*.

Bedingte Unabhängigkeit

Für eine binäre Zufallsvariable T mit $P_T(\{1\}) = P(T=1) = p$, $0 \leq p \leq 1$, gilt $E(T) = P(T=1) = p$. Später werden die Fälle $p=0$, $p=1$ ausgeschlossen. Seien $(T(x), x \in D)$ und $(B_\ell(x), x \in D)$, $\ell = 1, \dots, m$, zufällige Funktionen jeweils unabhängig identisch verteilter binärer Zufallsvariablen $T(x)$ bzw. $B_\ell(x)$, $\ell = 1, \dots, m$, mit $x \in D$. Wegen der identischen Verteilungen ist $P_{T(x)} = P_T$ bzw. $P_{B_\ell(x)} = P_{B_\ell}$, $\ell = 1, \dots, m$, für alle $x \in D$, d. h. diese Verteilungen sind ortsunabhängig. Zwei zufällige Prädiktoren B_i, B_j , die beispielsweise das zufällige Vorkommen T eines bestimmten Typs von Vererzung begünstigen, sind *bedingt unabhängig* bezüglich des Auftretens T dieser Vererzung, $B_i \perp\!\!\!\perp B_j \mid T$, falls die gemeinsame bedingte Verteilung in die einzelnen bedingten Verteilungen faktorisiert werden kann, $P_{B_i B_j | T} = P_{B_i | T} P_{B_j | T}$.

Bedingte Unabhängigkeit lässt sich anschaulicher auch so fassen, dass bei Kenntnis der Zufallsvariablen T die Zufallsvariable B_j für die Vorhersage von B_i irrelevant ist, d. h. $P_{B_i | B_j T} = P_{B_i | T}$; dabei dürfen B_i und B_j vertauscht werden. Zwei Zufallsvariablen können gleichzeitig signifikant korreliert und bedingt unabhängig gegeben eine dritte Zufallsvariable T sein. Während Korrelation ein Maß der Ausprägung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Zufallsvariablen ist, der ohne Zusatzinformation nicht als Maß für einen kausalen Zusammenhang interpretiert werden kann, ist bedingte Unabhängigkeit ein Konzept, Kausalität zu erschließen. Stoyan et al. (1997, 66–67) verwenden den Begriff Scheinkorrelation und führen ein Beispiel an, das eher ein Beispiel für bedingte Unabhängigkeit ist. Der Begriff der bedingten Unabhängigkeit kann offensichtlich für Mengen von Zufallsvariablen verallgemeinert werden.

Weights of Evidence

Die Methode der *weights of evidence* stellt – unter der mathematischen Modellannahme der bedingten Unabhängigkeit der als binär vorausgesetzten Prädiktoren bezüglich der binären Zielvariablen – die bedingte Wahrscheinlichkeit $P_{T | B_1 \dots B_m}$ mit Hilfe der Bayes'schen Formel nach einigen Umformungen schließlich als

$$P(T=1 | \mathbf{B}) = \Lambda \left(\ln O(T=1) + \sum_{\ell: B_\ell=1} W_\ell^{(1)} + \sum_{\ell: B_\ell=0} W_\ell^{(0)} \right) \quad (1)$$

dar. Dabei bezeichnet Λ die logistische Funktion (Abb. 1), $O(T=1) = P(T=1)/P(T=0)$ das odds von $T=1$ und

$$W_\ell^{(1)} = \ln \left(\frac{P(B_\ell=1 | T=1)}{P(B_\ell=1 | T=0)} \right), \quad W_\ell^{(0)} = \ln \left(\frac{P(B_\ell=0 | T=1)}{P(B_\ell=0 | T=0)} \right), \quad \ell = 1, \dots, m$$

die Gewichte (*weights of evidence*) bezüglich der Prädiktoren. Die Gewichte sind als logarithmierte *likelihood ratios* definiert (Good, 1950; 1983) und werden in der Praxis ebenso wie $O(T=1)$ mittels Auszählen von relativen Häufigkeiten im Trainingsgebiet geschätzt.

Die Anwendbarkeit der *weights of evidence* ist empfindlich durch die schwerwiegende mathematische Modellannahme der bedingten Unabhängigkeit eingeschränkt. Ist die Modellannahme nicht erfüllt, führt die Anwendung von *weights of evidence* zu systematischen Schätzfehlern. Es gibt vielfältige, allerdings allesamt untaugliche Versuche, Korrekturen in die Methode der *weights of evidence* für den Fall der Verletzung der Modellannahme der bedingten Unabhängigkeit einzuführen. Die Methode der *weights of evidence* ist darüber hinaus dadurch eingeschränkt, dass ausschließlich binäre Prädiktoren, d. h. solche, die zwei Zustände – anwesend, abwesend – repräsentieren können, verarbeitet werden können. Stetige Prädiktoren, beispielsweise der Abstand von einer geologischen Störung, müssen in einem Vorverarbeitungsschritt bezüglich eines benutzerdefinierten Schwellenwerts in zwei Klassen eingestuft werden. Setzt der Benutzer z. B. den Schwellenwert für den Abstand von einer geologischen Störung auf 100 m fest, dann ist der klassifizierte Abstand eines Probenorts mit einem Abstand kleiner oder gleich 100 m gleich 1, d. h. Störung anwesend, und der klassifizierte Abstand eines Probenortes mit einem Abstand größer als 100 m gleich 0, d. h. Störung abwesend. Dann hängt das Ergebnis der Höffigkeitsprognose von dieser Benutzerentscheidung, d. h. der Festlegung des Schwellenwerts, ab.

Logistische Regression

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(T=1|\mathbf{B})$ lässt sich im allgemeinen nicht unmittelbar als Linearkombination $\sum_{\ell} \beta_{\ell} \mathbf{B}_{\ell} = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{B}$ darstellen, sondern erst mittels einer geeigneten Link-Funktion \mathcal{L} ,

$$\mathcal{L}(P(T=1|\mathbf{B})) = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{B}$$

als Zielgröße eines verallgemeinerten Regressionsmodells (ohne Wechselwirkungsterme) modellieren. Logistische Regression benutzt die *Logit*-Transformation $P \mapsto \ln O$ als Link-Funktion \mathcal{L} . Da die logistische Funktion $\Lambda(z) = 1/(1 + \exp(-z))$ (Abb. 1) die Inverse der Logit-Transformation ist, lässt sich das Regressionsmodell in der Form

$$P(T=1|\mathbf{B}) = \Lambda(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{B}) \quad (2)$$

darstellen. Die Funktion $\Lambda(\alpha z)$, $\alpha > 0$, approximiert für zunehmende α schnell die Heaviside-Funktion (Schwellenwert- oder Aktivierungs-Funktion), ohne unstetig zu werden.

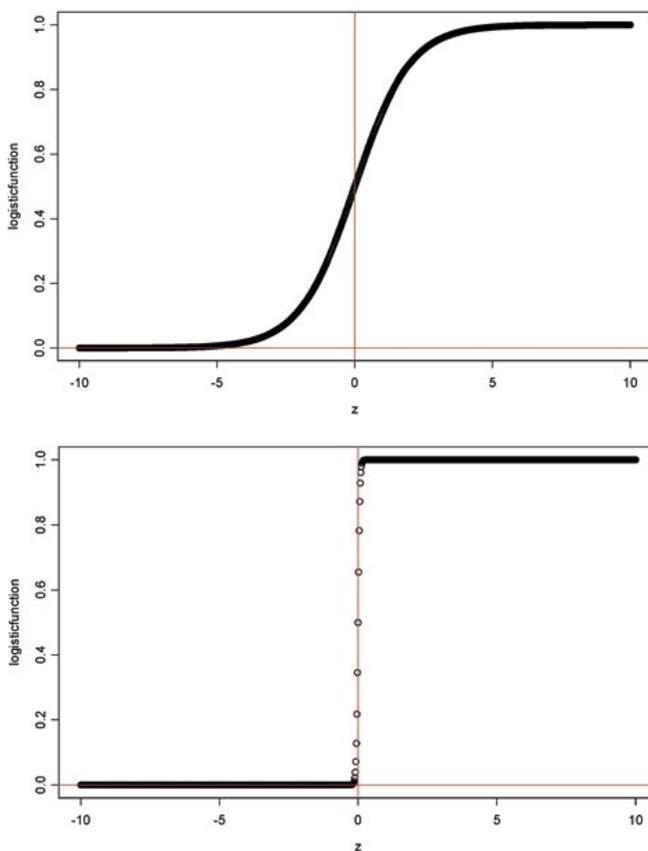


Abbildung 1: Graph der sigmoidalen Funktion $\Lambda(z)$ (oben) und $\Lambda(3z)$ (unten)

Verallgemeinerte Regressionsmodelle und insbesondere logistische Regressionsmodelle lassen sich auf unterschiedliche Weise numerisch angehen, beispielsweise klassisch statistisch, mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN) oder anderen *learning*-Algorithmen. In der Herangehensweise der klassischen Statistik werden die Parameter eines multiplen logistischen Regressionsmodells mit Hilfe der *maximum likelihood*-Methode geschätzt, die wiederum numerisch durch *Fisher's scoring algorithm* realisiert wird. *Fisher's scoring* ist eine Form des *Newton-Raphson algorithm* und ein Spezialfall des *iteratively reweighted least squares algorithm*. Alle Schätzwerte sind

dann mit einem Standardfehler (Quadratwurzel der Varianz des Schätzers) ausgestattet.

Künstliche neuronale Netze

Die Anwendbarkeit künstlicher neuronaler Netze (KNN) ist nicht auf Regressionsmodelle beschränkt, die mittels logit-Transformation bzw. logistischer Funktion konstruiert werden, sondern schließt andere *sigmoidale* Funktionen und deren Schachtelung als *Aktivierungsfunktion* zur Approximation der Schwellenwert-Funktion ein. Beispiele für sigmoidale Funktionen sind arctan, tanh oder algebraische Funktionen wie $z/\sqrt{1+z^2}$, $z/(1+|z|)$. Das KNN-Modell kann also größer sein, d. h. mehr und verschiedenartige Abhängigkeiten abbilden als das logistische Regressionsmodell. Der Spezialfall der logistischen Regression, Gl. (2), kann als *single layer perceptron* KNN mit der logistischen Funktion Λ als Aktivierungsfunktion konfiguriert werden. Geschachtelte Modelle

$$P(T=1|\mathbf{B}) = S \left(\sum_{j=0}^J \beta_j^{(2)} h \left(\underbrace{\sum_{\ell=0}^m \beta_{j\ell}^{(1)} \mathbf{B}_{\ell}}_{\text{"hidden layer"}} \right) \right) \quad (3)$$

mit sigmoidalen Aktivierungsfunktionen S und h (für „hidden“) werden *hidden layer perceptrons* genannt. Die Auswahl der Aktivierungsfunktionen kann unter anderem von der Komplexität der numerischen Auswertung der sigmoidalen Funktionen oder bestimmter Funktionale der sigmoidalen Funktionen geleitet sein. Am häufigsten wird die logistische Funktion Λ benutzt.

KNN wenden in der Anlernphase – *training* – zur Bestimmung der Modellparameter gewöhnlich eine Gradientenmethode – *linear perceptron training rule* – zur numerischen Lösung des Optimierungsproblems an, um die Summe der quadrierten Residuen zu minimieren. Die mit KNN bestimmten Schätzwerte sind im Allgemeinen nicht mit Standardfehlern versehen (Müller and Rios Insua, 1998; Moguerza and Muñoz, 2006).

“The term neural network has its origin in attempts to find mathematical representations of information processing in biological systems Indeed, it has been used very broadly to cover a wide range of different models, many of which have been the subject of exaggerated claims regarding their biological plausibility. From the perspective of practical applications to pattern recognition, however, biological realism would impose entirely unnecessary constraints.” (Bishop, 2006, p. 226).

Vergleich der Modelle

Ein stochastisches Modell ist eine Familie von Verteilungen einer endlichen Menge von Zufallsvariablen $(\mathbf{B}_v)_{v \in V} = \mathbf{B}_V$. *Graphische Modelle* (Lauritzen, 1996; Edwards, 2000; Koller und Friedman, 2009; Højsgaard, Edwards und Lauritzen, 2012), und insbesondere stochastische Graphen mit Markov-Eigenschaften bilden ein geeignetes mathematisches Konstrukt zur Darstellung und Visualisierung der Abhängigkeits- bzw. Unabhängigkeitsstruktur eines stochastischen Modells und erleichtern den operationellen Umgang mit bedingter Unabhängigkeit. Insbesondere eignen sie sich hier, den mathematischen Zusammenhang von *weights of evidence*, logistischer Regression und log-linearen Modellen in neuem Licht erscheinen zu lassen und zu klären (Schaeben, 2013). Ein *ungerichteter Graph* ist ein Tupel $\mathcal{G} = (V, E)$ aus einer endlichen Menge V

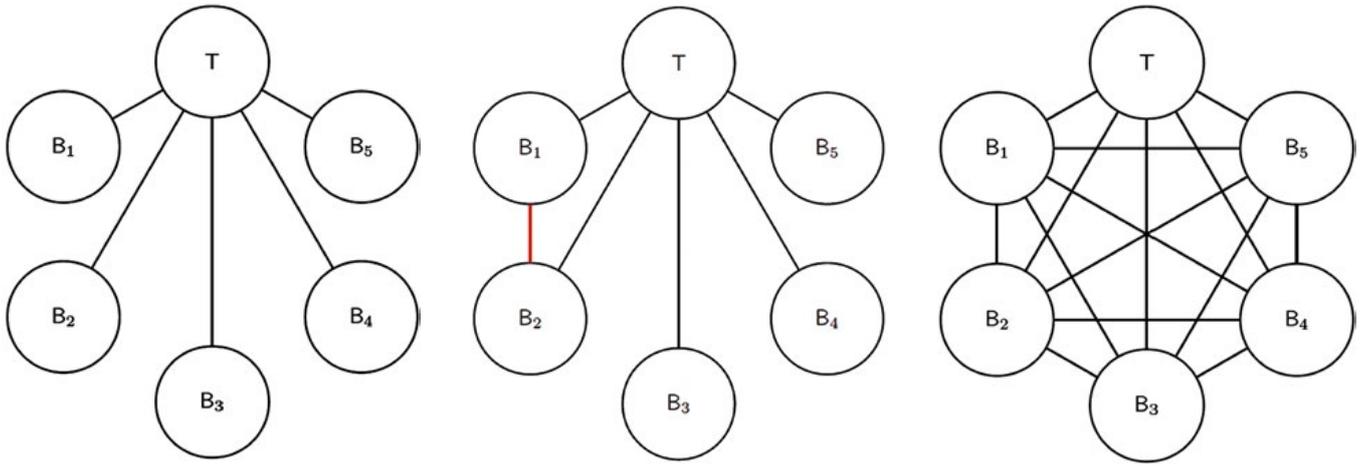


Abb. 2: Graphische Modelle zur Darstellung der Unabhängigkeitsstruktur stochastischer Modelle
 a) $B_i \perp\!\!\!\perp B_j \mid T, i \neq j$ (links), b) $B_i \perp\!\!\!\perp B_j \mid T, i \neq j$ außer für B_1, B_2 (Mitte), c) keine Unabhängigkeit, keine bedingte Unabhängigkeit, volle Abhängigkeit (rechts)

von Knoten und einer endlichen Menge E von ungerichteten Kanten, die Knoten verbinden. Cliques eines Graphen sind vollständige Teilgraphen; Graphen lassen sich in maximale Cliques zerlegen. Knoten stochastischer Graphen stellen gewöhnlich Zufallsvariable dar, Kanten zwischen je zwei Knoten stellen stochastische Abhängigkeit dar; insbesondere bedeutet eine Kante zwischen zwei Zufallsvariablen, dass sie nicht bedingt unabhängig gegeben alle übrigen Zufallsvariablen der Familie sind. Falls zwei Zufallsvariablen nicht adjazent, d. h. nicht durch eine Kante verbunden sind, dann sind sie bedingt unabhängig, gegeben alle anderen Zufallsvariablen. Dieser Zusammenhang zwischen der graphischen Eigenschaft der Nicht-Adjazenz und der stochastischen Eigenschaft der bedingten Unabhängigkeit wird *paarweise Markov-Eigenschaft* eines ungerichteten Graphen genannt.

Bedingte stochastische Unabhängigkeit $B_i \perp\!\!\!\perp B_j \mid T, i \neq j$, wird in einem stochastischen Graphen so dargestellt (Abb. 2), dass es keine Kante zwischen den Knoten B_i und B_j gibt, aber einen Pfad aus zwei Kanten von B_i über T nach B_j .

Diese Darstellung wird mathematisch als *globale Markov-Eigenschaft* so formalisiert, dass für beliebige disjunkte Teilmengen $V_1, V_2, W \subset V$ mit der Eigenschaft, dass die Menge W die Mengen V_1 und V_2 im graphischen Sinne separiert, die bedingte Unabhängigkeit $B_{V_1} \perp\!\!\!\perp B_{V_2} \mid B_W$ folgt. Die globale Markov-Eigenschaft stellt einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der graphischen Eigenschaft der Separierbarkeit und der stochastischen Eigenschaft der bedingten Unabhängigkeit her. Eine Familie mit dieser Eigenschaft wird *Markov-Zufallsfeld* genannt. Für ein Markov-Zufallsfeld stellt der Graph die der gemeinsamen Verteilung innewohnende Unabhängigkeitsstruktur vermittelt der globalen Markov-Eigenschaft vollständig dar. Unter der Annahme der Positivität haben Paz und Pearl (1987) die Äquivalenz der paarweisen, lokalen und globalen Markov-Eigenschaft gerichteter Graphen bewiesen. Schließlich sagt der *Satz von Hammersley und Clifford* aus, dass ein positives gemeinsames Wahrscheinlichkeitsmaß P_V genau dann die paarweise Markov-Eigenschaft bezüglich eines ungerichteten Graphen $\mathcal{G} = (V, E)$ besitzt, falls es gemäß den Cliques von \mathcal{G} faktorisiert.

Ein prominentes Beispiel für Familien, die geeignete Faktorisierungen zulassen, sind log-lineare Modelle, die logarithmierte Wahrscheinlichkeiten diskreter Zufallsvariablen in Form linearer Modelle darstellen. Die gemeinsame Verteilung

einer binären Zielvariablen und binärer oder kategorieller Prädiktorvariablen $B_\ell, \ell = 1, \dots, m$, lässt sich in log-linearer Form darstellen. Aus der gemeinsamen Verteilung $P_{T B_1 \dots B_m}$ lässt sich die bedingte Verteilung $P_{T \mid B_1 \dots B_m}$ gemäß

$$P_{T \mid B_1 \dots B_m}(t \mid b_1, \dots, b_m) = \frac{P_{T \mid B_1 \dots B_m}(t, b_1, \dots, b_m)}{P_{T \mid B_1 \dots B_m}(1, b_1, \dots, b_m) + P_{T \mid B_1 \dots B_m}(0, b_1, \dots, b_m)} \quad (4)$$

herleiten. Faktorisierung des Terms $P_{T \mid B_1 \dots B_m}$ auf der rechten Seite von Gl. (4) gemäß der in den Graphen (Abb. 2) erfassten Abhängigkeitsstruktur führt für den Fall $B_i \perp\!\!\!\perp B_j \mid T$ für alle $i \neq j$ (Abb. 2a) zu

$$P_{T \mid B_1 \dots B_m} = P_T \otimes_{\ell=1}^m P_{B_\ell} \otimes_{\ell=1}^m P_{T B_\ell} \quad (5)$$

oder für den Fall $B_i \perp\!\!\!\perp B_j \mid T$ für alle $i \neq j$ außer für B_1 und B_2 (Abb. 2b) zu

$$P_{T \mid B_1 \dots B_m} = P_T P_{B_1 B_2} P_{T B_1 B_2} \otimes_{\ell=1}^m P_{B_\ell} \otimes_{\ell=1}^m P_{T B_\ell} \quad (6)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit nimmt für den Fall der bedingten Unabhängigkeit, Gl. (5), die Form des logistischen Modells, Gl. (2), an; für den Fall der partiellen Verletzung der bedingten Unabhängigkeit, Gl. (6), die Form eines um einen Wechselwirkungsterm $\beta_{12} B_1 B_2$ erweiterten logistischen Modells. Der Wechselwirkungsterm $\beta_{12} B_1 B_2$ kompensiert also exakt die verletzte bedingte Unabhängigkeit für B_1 und B_2 gegeben T . Logistische Regressionsmodelle sind für Höffigkeitsprognosen in dem Sinne optimal, dass sie für binäre Prädiktoren die wahre bedingte Wahrscheinlichkeit entsprechend dem zutreffenden vollständigen Modell darstellen.

Resümierend lässt sich der Zusammenhang wie folgt darstellen. Falls die Prädiktorvariablen binär und bedingt unabhängig bei gegebener Zielvariablen sind, dann

- ist *weights of evidence* anwendbar,
- ist logistische Regression anwendbar und ergibt ohne Interaktionsterme die wahre bedingte Wahrscheinlichkeit.

Falls die Prädiktorvariablen binär und nicht bedingt unabhängig bei gegebener Zielvariablen sind, dann

- ist *weights of evidence* nicht anwendbar,
- ist logistische Regression anwendbar und ergibt unter Berücksichtigung von Interaktionstermen die wahre bedingte Wahrscheinlichkeit.

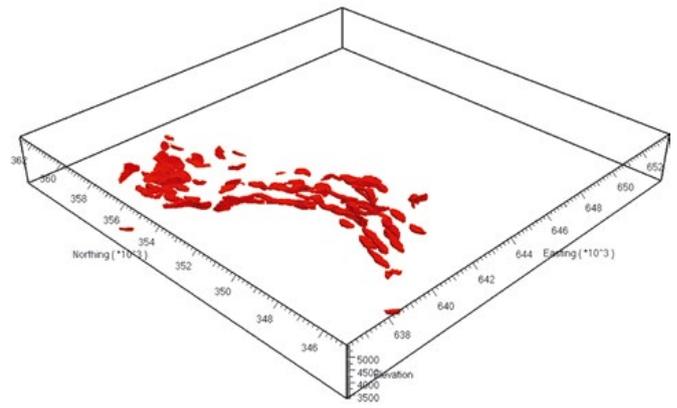
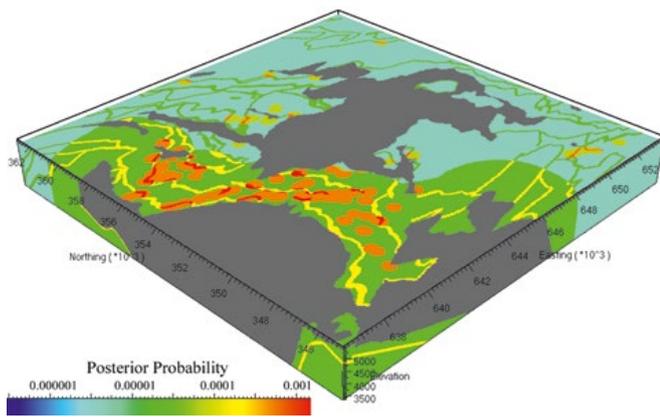


Abb. 3: Visualisierung der räumlichen Verteilung der geschätzten a-posteriori Wahrscheinlichkeit $P(T=1|B)$ (links) und der Voxel des gOcad-modells mit der größten geschätzten a-posteriori Wahrscheinlichkeit (rechts) [Böhme, 2007]

Falls Prädiktorvariablen stetig sind, dann

- ist *weights of evidence* nicht anwendbar,
- ist logistische Regression anwendbar; die Berücksichtigung von Interaktionstermen ergibt hinreichend gute Näherungen der wahren bedingten Verteilung, falls das log-lineare Modell eine hinreichend gute Näherung der gemeinsamen Verteilung darstellt.

Numerische Aspekte

Ein digitales 3-dimensionales Geomodell mit einem für Höffigkeitsprognosen hinreichenden räumlichen Auflösungsvermögen enthält häufig wesentlich mehr als $n = 10^9$ voxels. Dann führt ein logistisches Regressionsmodell ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungstermen mit z. B. $m = 10$ Prädiktorvariablen zu einem $(n \times m)$ System nicht-linearer Gleichungen, wobei $m \ll n$, zu dessen numerischer Lösung man gewöhnlich die Methode der *iteratively reweighted least squares* (Björck, 1996) benutzt. Sowohl für die entsprechenden normalen Gleichungen als auch für die numerisch stabilere *QR-Zerlegung* (Parker, 1994) liegt die numerische Komplexität eines Iterationsschritts in der Größenordnung von $2nm^2$ flops (Björck, 2013); die Anzahl der nötigen Iterationsschritte ist nicht allgemein abzuschätzen. Allein die Größenordnung zeigt nachdrücklich an, dass es zur numerischen Realisierung eines effizienten Datenmanagements und schneller – beschleunigter – Algorithmen bedarf. Dieser Bedarf besteht bezüglich aller Methoden, die die Lösung eines Systems nicht-linearer Gleichungen einschließen, also für alle Methoden außer *weights of evidence*, die die Gewichte durch Zählen schätzt.

Schlussfolgerungen

Aus der Sicht graphischer stochastischer Modelle lassen sich *weights of evidence*, logistische Regression ohne und mit Wechselwirkungstermen und künstliche neuronale Netze in eine hierarchische Ordnung bringen, wobei jedes frühere ein Spezialfall des nächsten Modells ist. *Weights of evidence* setzt die weitestgehende Modellannahme der bedingten Unabhängigkeit binärer Prädiktorvariablen voraus, die die Anwendbarkeit verhindert oder zumindest einschränkt. Die Anwendbarkeit logistischer Regression ist nicht eingeschränkt. Unter der schwachen Annahme eines log-linearen Modells für die gemeinsame Verteilung der Prädiktor- und Zielvariablen sind logistische Regressionsmodelle in dem Sinne für Höffigkeitsprognosen optimal, dass sie die wahre bedingte Wahrschein-

lichkeit der Zielvariablen bei gegebenen Prädiktorvariablen ergeben. Künstliche neuronale Netze schachteln Regressionsmodelle mit sigmoidalen Ansatzfunktionen ein.

Danksagung

Mathematische Modelle der Höffigkeitsprognose sind ein Beitrag der Mathematischen Geologie und Geoinformatik im Institut für Geophysik und Geoinformatik der Bergakademie zum EU Projekt "Nano-particle products from new mineral resources in Europe – ProMine", das von der Europäischen Gemeinschaft im 7. Rahmenprogramm unter dem Bewilligungsvertrag 228559 bis April 2013 finanziell gefördert wurde. Diese Veröffentlichung gibt ausschließlich die Meinung ihres Autors wieder und nimmt die Europäische Gemeinschaft von jeder Haftung aus.

Literaturverzeichnis

- 1 Bishop, C.M., 2006, Pattern Recognition and Machine Learning: Springer
- 2 Björck, A., 1996, Numerical Methods for Least Squares Problems: SIAM
- 3 Björck, A., 2013, Persönliche Kommunikation
- 4 Böhme, M., 2007, Predictive 3D Mineral Potential Modelling: Application to the VHMS Deposits of the Noranda District, Canada: Geologie Diplomarbeit, Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg
- 5 Cox, D.P., Singer, D.A., eds., 1986, Mineral Deposit Models: U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 379 p
- 6 Edwards, D. 2000, Introduction to Graphical Modelling (2nd ed.): Springer
- 7 Good, I.J., 1950, Probability and the Weighing of Evidence: Griffin, London
- 8 Good, I.J., 1983, Good Thinking - The Foundations of Probability and Its Applications: The University of Minnesota Press
- 9 Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2001, The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction: Springer
- 10 Højsgaard, S., Edwards, D., Lauritzen, S., 2012, Graphical Models with R: Springer
- 11 Hosmer, D.W., Lemeshow, S., 2000, Applied Logistic Regression, 2nd ed.: Wiley
- 12 Lauritzen, S.L., 1996, Graphical Models: Clarendon Press, Oxford
- 13 Moguerza, J.M., Muñoz, A., 2006, Support Vector Machines with Applications: Statistical Science 21, 322-336
- 14 Müller, P., Rios Insua, D., 1998, Issues in Bayesian analysis of neural network models: Neural Computation 10, 740-770
- 15 Parker, R.L., 1994, Geophysical Inverse Theory: Princeton University Press
- 16 Russell, S., Norvig, P., 2003, Artificial Intelligence - A Modern Approach, 2nd ed.: Prentice Hall
- 17 Schaeben, H., 2011, Comparison of Mathematical Methods of Potential Modeling: Mathematical Geosciences 44, 101-129, DOI 10.1007/s11004-011-9373-2
- 18 Schaeben, H., 2013, A Mathematical View of Weights of evidence, Conditional Independence, and Logistic Regression in Terms of Markov Random Fields: Mathematical Geosciences, submitted
- 19 Singer, D.A., Menzie, W.D., 2010, Quantitative Mineral Resource Assessments, an Integrated Approach: Oxford University Press
- 20 Stoyan, D., Stoyan, H., Jansen, U., 1997, Umweltstatistik: Statistische Verarbeitung und Analyse von Umweltdaten: Teubner Verlag

Fracking zur Gewinnung unkonventioneller Erdgas-Erdöl-Vorräte und geothermischer Energie aus tiefen Felsgesteinen

Hans-Jürgen Kretzschmar, Mohammed Amro, Steffen Wagner

Einleitung

Fracking, Fracturing, Frac-Behandlung – ein vielgestaltiger Anglizismus von aktueller politischer, journalistisch „aufgewerteter“ Bedeutung, der für die in der Tiefbohrtechnik jahrzehntelang genutzte Technologie zur Stimulation bzw. zur Erhöhung der Produktivität von Öl-, Gas- und Geothermiebohrungen steht, mit der man die Zuflussbedingungen zu den Bohrungen durch technisch erzeugte Klüfte wesentlich verbessert.

Fracking wurde 1948 erstmalig in einer US-amerikanischen Ölbohrung praktiziert [1] und hat sich wissenschaftlich-technisch seither über mehr als ein halbes Jahrhundert hinweg zu einer Standardtechnologie beim Tiefbohren entwickelt. Weltweit wurden bisher über eine Million Frac-Behandlungen in Öl- oder Gasbohrungen durchgeführt, davon in Deutschland etwa 500, ca. 200 in den östlichen Bundesländern schon zu DDR-Zeiten. In den USA zählt man heute etwa 20.000 Frac-Behandlungen jährlich.

Bisher ist in der Fachliteratur der Erdöl-Erdgas-Wirtschaft kein einziger Fall eines nicht bergsicheren Frackings publiziert worden. Natürlich bestünde bei einem etwaigen Unfall auch keine besondere Neigung, über das Vorkommen zu publizieren. Aber auch den Autoren dieses Beitrags ist kein Fall eines umweltgefährdenden Frackings in Deutschland bekannt. Dessen ungeachtet wurde von journalistischer Seite tendenziös-verunglimpfend der „Mythos des brennenden Wasserhahnes“, namentlich im US-Dokumentarfilm „Gasland“ [2] weltweit in die TV-Szene gesetzt. Nach Richtigstellung seitens der US-Regierung musste der offenbar unseriöse Filmemacher diesen Clip zurückziehen: In Wirklichkeit war biogenes Bodengas einer flachen Bodenzone über einen undichten Wasserbrunnen in das Trinkwasser gelangt und konnte auf spektakuläre Art entzündet werden. Dieses Gas stand aber in keinerlei Zusammenhang mit der Erdgasgewinnung aus tiefen Lagerstätten oder gar mit dem Fracking. Aus diesem unsachlicher Weise konstruierten, scheinbaren Zusammenhang folg-

ten in Deutschland aber dennoch „politisch motivierte Verbote“ zum Fracking. Gegenwärtig ist es daher geboten, die Fracking-Technologie wieder sachlich und montanwissenschaftlich fundiert zu betrachten, weil sie – bergsicher durchführbar – die einzige effektive Intensivierungsmaßnahme zur Öl- bzw. Gasförderung aus tiefen, unkonventionellen Lagerstätten und zur Gewinnung geothermischer Energie aus tiefem, ungeklüftetem Felsgestein ist. Unter dem Begriff unkonventionelle Energiegewinnung sollen hier ausschließlich die Erdgasgewinnung aus tiefen, extrem geringpermeablen Schiefergas-Lagerstätten und die Geothermie zur Gewinnung von Wärme aus tiefen Felsgesteinen (Petrothermie) verstanden werden.

Schiefergas (Shale Gas)

Die Schiefergas-Förderung in den USA deckt heute etwa 60% des dortigen Gasverbrauchs. Das Land ist vom Gasimporteur zum -exporteur geworden. Die Gaspreise sind auf ca. 25% ihres früheren Niveaus gefallen, was den Welt-Gasmarkt infolge Überangebots durcheinanderbrachte. Wer würde sich in Deutschland nicht so eine Energiepreisentwicklung wünschen?

Das Schiefergaspotenzial der Welt soll – hierzu gibt es nur vage Schätzungen – dem Doppelten der gegenwärtigen konventionellen Welt-Gasvorräte entsprechen, die gegenwärtige Erdgas-Vor-

ratsreichweite damit also auf ca. 400 Jahre verlängern. Die Menschheit kommt angesichts dieser Prognose nicht umhin, das genannte Ressourcenpotenzial näher zu untersuchen. Abb. 1 vermittelt dazu einen Weltüberblick.

Aus ihm wird ersichtlich, dass Nordamerika weitgehend erkundet ist – mit seinem bereits über einen längeren Zeitraum praktizierten Schiefergasabbau, während Asien und Afrika angesichts der erst in relativ geringem Ausmaß angezapften Vorkommen noch größere Vorratsperspektiven aufweisen. In Europa kam in Polen die Erkundung mittels 15 Tiefbohrungen am weitesten voran; sie weist nun ein Potenzial an gewinnbarem Gas von ca. 5 Tm³ (Billionen Kubikmeter, 10¹² m³) aus. Deutschland blieb hierbei hinter der europäischen Entwicklung zurück. Geologische Schätzungen der BGR Hannover ergeben ein gewinnbares Potenzial von ca. 1 Tm³ [1,3], das die deutschen konventionellen Gasvorräte mehrfach übersteigen würde.

Die Schätzungen dieser Schiefergasvorräte beruhen auf der Annahme eines Gasabbaufaktors von nur 10% des geologischen Gasvorrats. Dieser Wert muss jedoch gewinnungstechnisch weltweit noch belegt werden; er kann regional auch auf 1% zurückgehen. Er hängt stark von den Erfolgen des Frackings ab. Die Schiefergesteine als Mutter- und Speichergesteine des sorptiv gebundenen Erdgases geben dieses nur über tech-

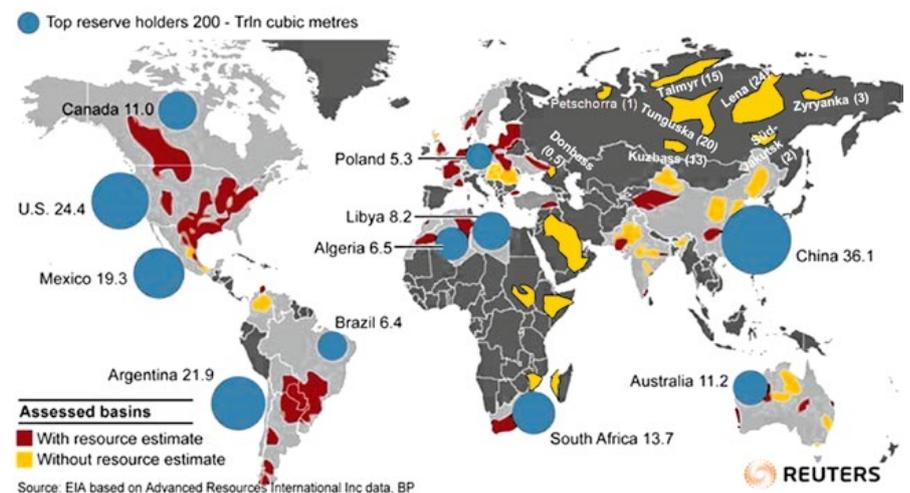


Abb. 1: Abschätzung der Schiefergasvorräte in der Welt

nisch geschaffene Klüfte ab; ansonsten bleiben sie „dichtes-totes“-Gasgestein. Andererseits weisen diese gegenwärtig so niedrigen Abbaufaktoren auf die gewaltigen geologischen Gasvorräte hin, die es mit montantechnischen Bohrmethode künftigt zu aktivieren gilt.

Petrothermie

Im Vergleich aller zur Stromerzeugung herangezogenen regenerativen Energiequellen bietet die Geothermie den generellen Vorteil, dass sie – im Gegensatz zum volatilen Wind- und Solarenergieaufkommen – für die stetige Grundlastversorgung nutzbar ist.

Im Unterschied zur Hydrothermie, der geothermischen Heißwassergewinnung aus porösen Tiefenaquifere, nutzt die Petrothermie tiefe Magmatitgesteine (4 bis 5 km), in die – als Geowärmetauscher – Kaltwasser injiziert und dann als Heißwasser gefördert wird. Dazu sind mindestens zwei Tiefbohrungen erforderlich, die über ein weitreichendes Kluftsystem mit großer Wärmetauscherfläche miteinander verbunden sind. Ein solches künstlich erzeugtes Rissystem kann nur durch Fracking geschaffen werden. *Abb. 2* skizziert ein entsprechendes technologisches Schema.

Petrothermale Kraftwerke zur Stromerzeugung mit Fernwärmenutzung erfordern in Mitteleuropa Fördersubventionen, um einen wirtschaftlichen Betrieb realisieren zu können. Die enormen Kosten für die Tiefbohrungen aber sind und bleiben vorläufig eine große Hürde für den zu erbringenden Marktfähigkeitsnachweis. Auch in diesem Punkt befinden wir uns also noch im Untersuchungsstadium, das zudem mit dem Georisiko verbunden ist, ob man die erforderlichen großen, dauerhaft standfesten Geowärmetauscherflächen durch Fracking wirklich wird schaffen können. Ein weiterer, höchst relevanter Untersuchungsaspekt ist die Frage nach der gegebenenfalls künstlich hervorgerufenen Seismizität infolge des Zusammenspiels von Kaltwasserinjektion und Heißwasserförderung [4].

Fracking-Technik

Bohrplatz

Bohrplätze werden unter Bergamtskontrolle so genehmigt, gebaut und betrieben, dass ein Eindringen von Wasser in den Boden während der Bohr- und Behandlungszeiten nicht auftreten kann (temporäre Flächenversiegelung). Während der Frac-Behandlung mit einem

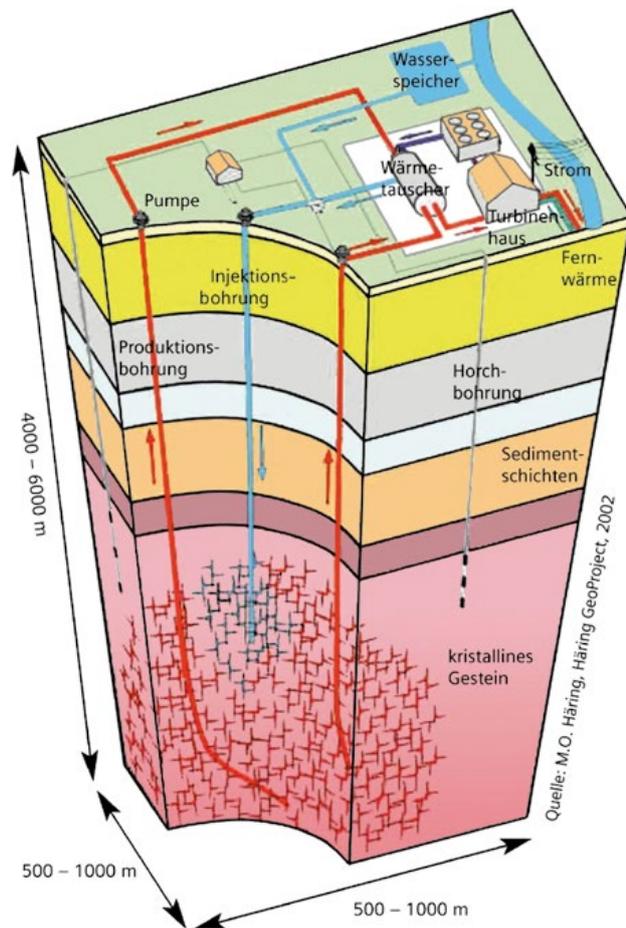


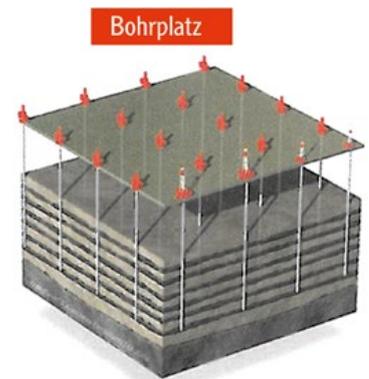
Abb. 2: Geo-Technologisches Schema der Petrothermie



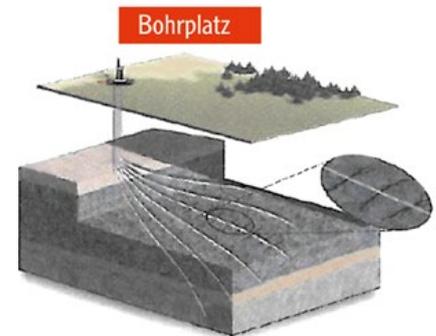
Abb. 3: Obertage-Bohrplatzausrüstungen für eine Frac-Behandlung, Bohrung neben dem roten Kran (Quelle: Exxonmobil)

Flüssigkeitsvolumen von üblicherweise 200 bis 500 m³ – maximal bis 5.000 m³ – wird die Obertage-Injektionstechnik weitgehend umweltschonend, wie in *Abb. 3*, gezeigt installiert. Alle technischen Einheiten, wie Pumpen, Tanks, Mischer und Leitungs-Manifolde, sind auf mobile Trucks montiert und nach einem Baukastensystem aufgebaut. Die erkennbar umfangreiche Injektionstechnik verursacht zwar hohe Behandlungskosten, gewährleistet aber den Schutz von Boden und Wasser.

Die Landnahme durch Bohrungen wird heute durch die Bildung von Bohrungsklustern, von denen Horizontalbohrungen ausgehen, minimiert, wie in *Abb. 4* skizziert.



„Klassische“ Vertikalbohrtechnik



Multilaterales Bohren und Fracken

Abb. 4: Bohrungsflächen und Vorteile der Horizontalbohrtechnik (Quelle: ITE)

Nicht mehr einzelne Vertikalbohrungen mit je einem Bohrplatz, sondern viele Bohrlochköpfe auf einem Bohrplatz mit zahlreichen Multilateralen erfassen das Reservoir. Allerdings ist – verglichen zu den Weiten in den USA – im dichter besiedelten Deutschland auch diese Art der Flächennahme limitiert.

Bohrungsintegrität

Standfestigkeit und Dichtheit der Bohrungen sind oberste Prinzipien im bereits jahrzehntelang praktizierten Bohrbetrieb, der unter laufender bergamtlicher Kontrolle steht. Deshalb werden Bohrungen mehrfach mit Stahlrohren, die gegeneinander zwecks hoher Festigkeit und Dichtheit zementiert werden, ausgebaut, um jeden Kontakt zum Gebirge auszuschließen. Die laufende Dichtheitskontrolle im Bohrbetrieb gewährleistet es, die Integrität der Bohrung zu überwachen und (im seltenen Problemfall die Reparatur der Rohr- oder der Zementsektion vorzunehmen. Auf diese Weise sind die bis zu zehntausend Bohrungen in Deutschland vom Gebirge, vom Boden und vom Grundwasser isoliert. Die wenigen Bohrunfälle – meist während des Niederbringens – sind vorwiegend durch personelles Versagen verursacht, das sich nicht völlig ausschließen lässt, jedoch bohrtechnologisch wieder ausgeglichen werden kann. Während der Frac-Behandlung unter hohem Druck wird die Bohrung durch den temporären Einbau eines speziellen, druckfesten Injektionsstrangs abgesperrt und solange keiner Druckbelastung ausgesetzt.

Geomechanisch-hydraulisches Fracking

Ein Überblick über das in den letzten Jahrzehnten entwickelte Frac-Technologie-Bohren im Gebirge wird in [5, 6, 7] gegeben. Das geomechanische Prinzip ist dabei das kontrollierte Aufreißen einer ausgewählten Gebirgsschicht von der Bohrung aus. Das geschieht mittels einer Frac-Flüssigkeit, die unter hohem Druck über die Bohrung an diese Gebirgsschicht herangeführt wird, wodurch deren Zugfestigkeit im Hinblick auf die Rissbildung überschritten wird. Der Fracdruckgradient wird geomechanisch gemäß Abb. 5 so eingestellt, dass die Geointegrität des Deckgebirges unangetastet bleibt.

Die Garantie der Unversehrtheit der schützenden Deckschichten durch Gewährleistung des Verbleibs unter der

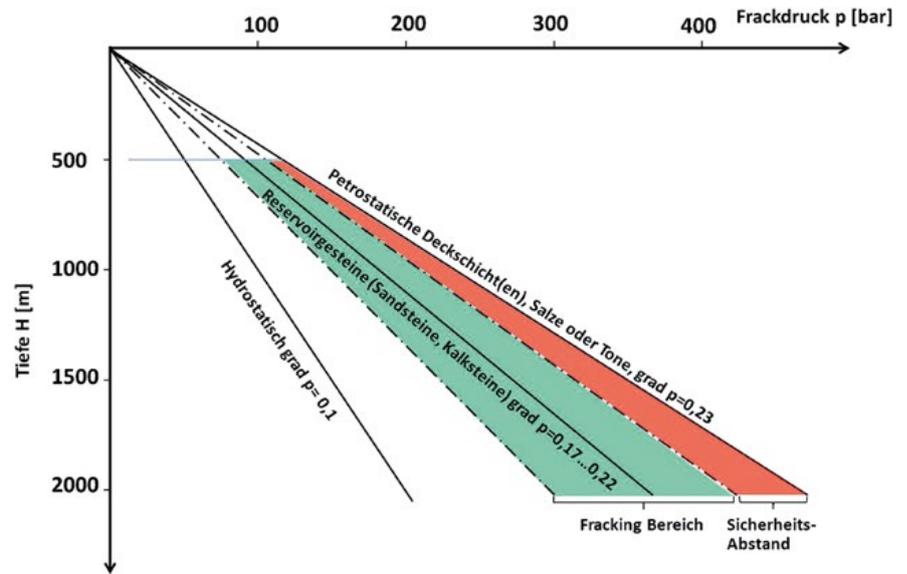


Abb. 5: Frack-Gradienten in Gas-/Öl-Reservoir- und Deckgesteinen

geomechanischen Druckgrenze in diesen Schichten hat oberste Priorität bei einer jeden Frac-Planung und -Behandlung. Die Einhaltung der Deckgebirgsintegrität wird während der Fracbehandlung sekundlich über das Monitoring des Injektionsdrucks beobachtet. Erkennbare Anomalitäten führen im sich evtl. abzeichnenden Problemfall zum sofortigen Abbruch der Behandlung. Abb. 5 deutet auch an, dass Fracking nur in Tiefen unter 500 m – bisher zwischen 800 und 6.000 m – praktiziert wird. Damit besteht zu den Grundwasserschichten hin (Maximaltiefe 300 m, Normaltiefe 20 bis 100 m) in Deutschland eine ausreichende geologische Barriere im Deckgebirge zwischen „gefractur“ Schicht und den Grundwasserleitern, die zumeist von mächtigen Ton- oder Salzschiefern gebildet wird. Der Grundwasserschutz beim Fracking ist die fundamentale Aus-

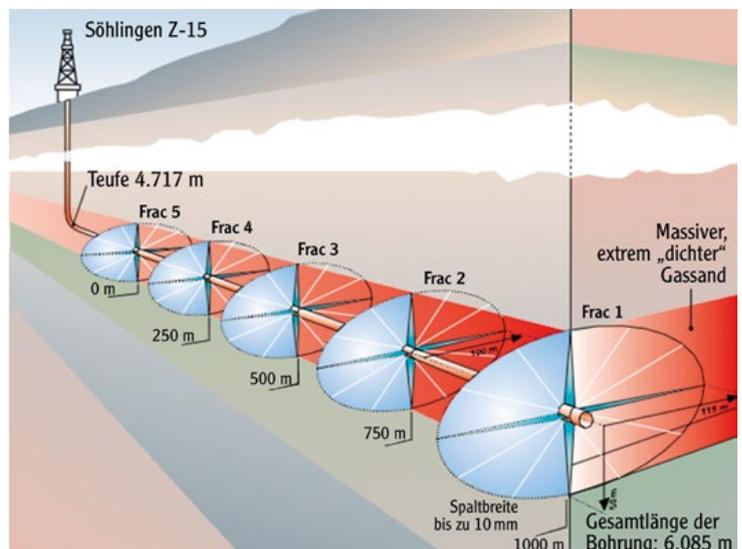
gangsposition; sie wurde bisher bei allen Frac-Behandlungen eingehalten [7].

In einer Horizontalbohrung für eine im Abbau befindliche Tight-Gas-Lagerstätte (eine höherpermeable Variante der Shale-Gas-Lagerstätte) ergeben sich die Parameter der entstandenen Rissflächen (Höhe, Länge, Weite) gemäß der Abb. 6. Diese „aufgespießten“ Rissgeometrien werden durch geomechanisch-hydraulische 3-D-Simulationsmodelle vorausgerechnet und während der Injektion kontrolliert. Es gibt also kein „wildes, chaotisches“ Gebirgsaufreißen!

Das Beispiel eines Simulationsmodell-Ergebnisses zeigt Abb. 7. In ca. 3.000 m Tiefe ist ein etwa 75 m hoher Riss mit einer (Halb-)Länge (von der Bohrung aus) von 120 m und einer Weite von maximal 2 cm gebildet worden. Das erforderliche Injektionsvolumen an Frac-Flüssigkeit betrug 200 m³.

Abb. 6: Rissysteme in einer Horizontalbohrung der Tight-Gaslagerstätte Söhlingen.

2007: 5 Fracs in einer 1.000-m-Horizontalbohrstrecke in ca. 25 Tagen [ExxonMobil, 2009]



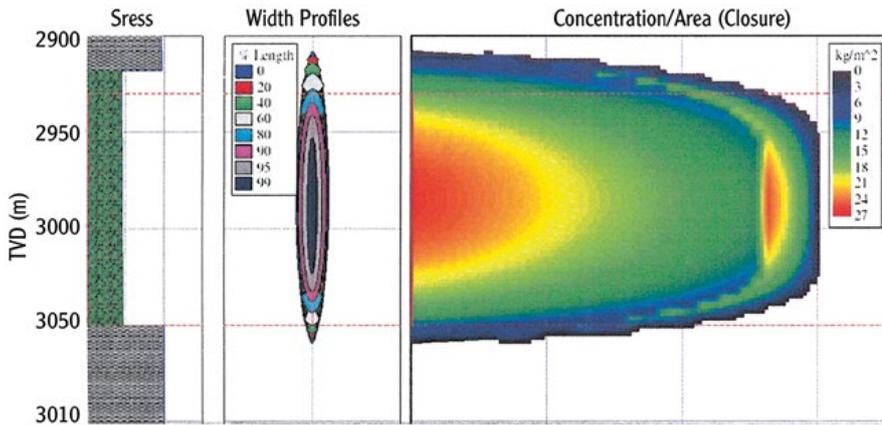


Abb. 7: Rissgeometrie als 3D-Modellergebnis

Die direkte Verifizierung der Modellergebnisse – eine in-situ-Kontrolle – des geschaffenen Fracs ist zwar in der Bohrtechnik naturgemäß nicht möglich. Doch ist im Saar-Kohlenbergbau [8] nachträglich eine visuelle Risskontrolle gelungen: Der Riss im Abbau-Vorfeld in einer tiefen CBM-Bohrung (CBM-Coal Bed Methane-Gewinnung) konnte nach Jahren der Flözgasförderung im Streb angefahren werden. *Abb. 8* gibt das Untertage-Foto wieder. Seine Parameter entsprechen durchaus annähernd den Modellergebnissen. Mit der Frac-Flüssigkeit wird gleichzeitig Sand eingespült, als Proppant zur Abstützung der gebildeten Risse gegen das Wieder-Schließen nach dem am Ende der Frac-Behandlung abgelassenen Druck. *Abb. 7* zeigt zudem die Sandkonzentration im Riss; wo diese am höchsten ist, hat man auch die beste hydraulische Durchlässigkeit für Wasser, Gas oder Öl. Ohne den Sand als Proppant würde das Fracking ineffektiv bleiben.

Fracking-Flüssigkeiten

Die Frac-Flüssigkeit hat eine Doppelfunktion zu erfüllen: Druckübertragung von Übertage an die ausgewählte Gebirgsschicht, um diese aufzureißen und den Riss kontrolliert fortzubilden; klares Wasser würde dazu ausreichen; Transport des Proppants/Sandes durch die Bohrung und den schmalen Riss bis zu dessen Spitze. Wegen seiner zu geringen Viskosität kann Wasser aber Sand nicht tragen. Er würde sich sofort im tiefsten Bereich der Bohrung absetzen und diese verstopfen.

Eine Frac-Flüssigkeit muss also solche rheologischen Eigenschaften besitzen, die das Tragen des Sandes gewährleisten. Das Wasser (Newtonsche Flüssigkeit) muss zu einer Gelflüssigkeit (zu einem Nicht-Newtonschen Fluid)

umfunktioniert werden. Dafür werden chemische Substanzen in das Wasser eingebracht, die als Additive ökologisch zu kontrollieren sind. Eine Frac-Flüssigkeit besteht heute zu mindestens 98 % aus den Naturstoffen Wasser und Sand. Maximal 2 % Additive sind Substanzen zur Gewährleistung der Gelbildung und einer Reibungsminderung (Tenside) sowie Biozide (zur Verhinderung der Ansiedlung von Mikroorganismen).

Die aktuellen politischen Fracking-Diskussionen haben freilich zu ökologisch motivierten Weiterentwicklungen in den Flüssigkeitsrezepturen geführt. Dabei sind eine unsachliche und ideologisch ausgerichtete Argumentation bezüglich des sog. „Chemikaliencocktails“ oder gar der Terminus „Giftchemikalien“ nicht hilfreich. *Abb. 9* charakterisiert eine aktuell entwickelte Slick-Water-Fracrezeptur. Ohne auf die Chemie von Rezepturen hier näher eingehen zu können, ist festzustellen:

- Die Frac-Flüssigkeit ist nach Chemikalienrecht nicht kennzeichnungspflichtig und kein Gefahrgut.
- Die Frac-Flüssigkeit ist nicht giftig und nicht umweltgefährdend.
- Die Frac-Flüssigkeit gefährdet namentlich nicht das Trinkwasser.

Die Geobarriere zwischen Grundwasserleitern und gefracter Gebirgsschicht beträgt – wie bereits erwähnt – Hunderte bis Tausende von Metern. Eine Schiefergas-Lagerstätte ist ein geschlossenes Reservoir (sonst bestünde sie bzw. dieses ja heute nicht mehr), in dem ein Teil der Frac-Flüssigkeit abgeschlossen verbleibt. Ein geklüfteter Petrothermie-Körper enthält einen abgeschlossenen Wasserkreislauf. Beide Reservoirs bleiben also von der Hydro- und von der Biosphäre isoliert.

Nach der Frac-Behandlung wird ein



Abb. 8: Aufgefahrener Frac einer CBM-Bohrung in der Flözfirste [8]

Teil der Frac-Flüssigkeit nach Übertage zurückgeführt, um den Riss freizuspülen. Diese Rückflussmenge wird in geschlossenen Tanks auf dem versiegelten Bohrplatz gesammelt und entweder in behördlich geprüfte, zugelassene Versenkbohrungen injiziert (meist in das gleiche Reservoir) oder in speziellen Kläreinrichtungen umweltgerecht aufbereitet.

Seismisches Monitoring

Fracking ist ein temporärer (einige Stunden bis wenige Tage dauernder) Eingriff in den geomechanischen Grundzustand des Gebirges rings um die Bohrung, m.a.W. eine Energiezustandsänderung in einem abgeschlossenen System. Eine solche induzierte Aktivität führt in seismisch inaktiven Gebieten zu keiner von Menschen bemerkbaren Auswir-

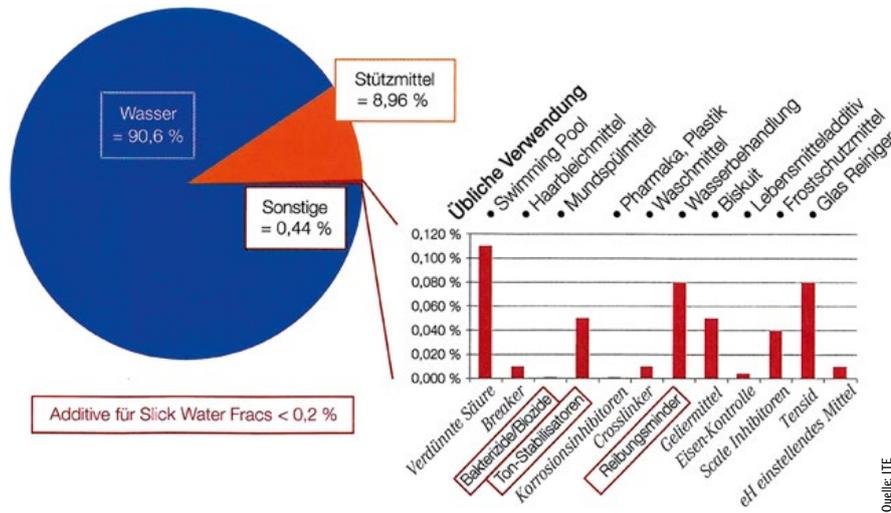


Abb. 9: Slick Water-Fracrezeptur mit reduziertem Additivspektrum (kursiv = nicht mehr verwendete Additive)

kung. Tatsächlich ist bisher in den Gas/Öl-Sedimentbecken beim Fracking keine seismische Aktivität aufgetreten. Dennoch werden zeitweilig – zusätzlich zum bestehenden Geophone-Netz – in den Öl/Gas-Provinzen um die zu „frackende“ Bohrung herum zusätzliche Geophone installiert, um eventuell auftretende Mikrobeben zu erfassen. In der Petrothermie wird während des Frackings ein seismisches Überwachungskonzept, untersetzt mit einem Reaktionsplan zum Abbruch oder zur Reduzierung der Frac-Behandlung, installiert.

Fracking-Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept, welches über Jahrzehnte praktizierten Frackings entwickelt worden ist, umfasst folgende Festlegungen und Maßnahmen:

- Fracking unterliegt dem Betriebsplanverfahren des Bundesberggesetzes sowie bergamtlichen Kontrollen.
- Bohrplätze sind zum Boden hin versiegelt und trennen die obertägigen Handlungen von Boden und Wasser.

- Die Bohrlochkonstruktion ist im gesamten Deckgebirge bergsicher gestaltet und bei evtl. auftretenden Undichtigkeiten reparierbar.
- Die Planung der geomechanisch-hydraulischen Rissbildung ist wissenschaftlich so zuverlässig entwickelt, dass der Schutz des Deckgebirges als Geobarriere zum Grundwasser gewährleistet ist.
- Die Rissausbildung wird online über die während der Frac-Behandlung ausgeübte Injektionskontrolle gesteuert. Im Anomaliefall kann die sofortige Reduzierung bzw. der Abbruch der Injektion ausgelöst werden.
- Das seismische Monitoring ist ebenfalls Bestandteil der Injektionskontrolle, die ausgeübt wird, um ein evtl. Restrisiko durch ggf. induzierte Seismizität in empfindlichen Gebieten kontrolliert abzubauen (bezieht sich vorrangig auf die Petrothermie).
- Die Frac-Fluidrezeptur entwickelt sich immer mehr hin zu einer additivarmen, ökologisch unbedenklichen Mischung aus Wasser und wenigen Additiven. Wei-

tere Stoffsubstitutionen werden die theoretisch dennoch möglichen Beeinflussungen der Wasserqualität mindern. De facto aber geht von dem eingebrachten Fluid infolge der Abgeschlossenheit des Reservoirs keine reale Gefahr für den Boden und das Wasser aus. Seine nach dem Fracking rückgeführten Mengen werden kontrolliert entsorgt bzw. aufbereitet. Die aktuellen gesetzlichen, zusätzlichen Vorschriften für das Fracking,

- generelle, aber gestufte UVP (Umwelt-Verträglichkeits-Prüfung) und
- Fracking-Verbot in speziellen Wasserschutzgebieten

Fracking-Forschungsaktivitäten der TU Bergakademie Freiberg

Der Weiterentwicklung der Geowissenschaften und der Auswertung von Praxiserfahrungen dienen die nachfolgend genannten Forschungsprojekte an unserer TU, deren Ergebnisse die Bergsicherheit und die Energieeffizienz des Frackings weiter ausprägen werden. Am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau laufen folgende Projekte zur Untersuchung von Stimulationsverfahren:

Stabilität gecoateter Proppants (Abb. 10)

Gecoatete Proppants sind künstlich hergestellte Partikel, die in Öl- und Gasbohrungen eingebracht werden, um die im Frac-Prozess neu geschaffenen Klüfte gegen den Gebirgsdruck offen zu halten. Für die Variierung von deren Größe und Oberflächenbeschaffenheit (Beschichtung) steht eine Vielzahl Proppants zur Verfügung, wodurch es möglich wird, für die in der Lagerstätte vorherrschenden Bedingungen optimal geeignete Proppants einzusetzen. Die Stabilität der Proppants unter hohem Druck und hoher

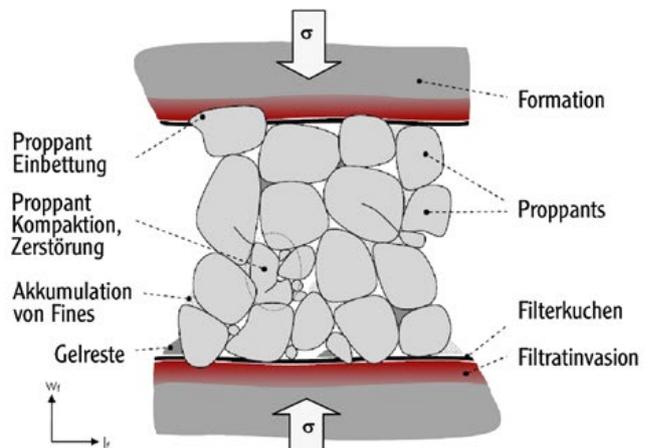


Abb. 10: Stabilität gecoateter Proppants (Teichmüller 2008)



Abb. 11: Kern, durchströmt mit XC-Polymer-HCl-Mischung

Temperatur ist dabei ein wichtiger Faktor für die Produktivität des Förderprozesses. Die mechanische Stabilität der Proppants (Bruchfestigkeit, Deformationswiderstand) sowie die chemische Stabilität gegenüber Behandlungs- und Formationsfluiden sind Teilgegenstände der Untersuchungen.

Stimulationsexperiment im Malmkalk in einer tiefen Geothermiebohrung in Mauerstetten (Abb. 11)

Im Rahmen des durch das BMU geförderten Projekts steht die Aufgabe, die Geothermie-Bohrung Mauerstetten nach Feststellung der zu geringen Wegsamkeit der ersten Bohrung durch ausgewählte Stimulationsverfahren in ihrer geothermischen Wirksamkeit deutlich zu ertüchtigen. Nach geologischen sowie geomechanischen Voruntersuchungen und auch entsprechenden Laborexperimenten ist ein Hydrofrac-Versuch geplant. Bei erfolgreicher Durchführung ist vorgesehen, eine Dublettenbohrung niederzubringen, um den Standort Mauerstetten letztlich doch geothermisch versorgen zu können. Projektpartner sind unter anderem das Institut für Geotechnik, das Institut für Geologie der TU Bergakademie sowie das Geoforschungszentrum Potsdam.

Untersuchung von möglichen Folgen des Überlagerungsdrucks und der Drucklösung für die hydraulische Leitfähigkeit in durch Proppants abgestützten Klüften im Karbonatgestein

Ziel dieser Untersuchung ist es, mögliche Effekte einer Drucklösung aufgrund des Überlagerungsdrucks festzustellen. Diese Effekte müssten sich in einer Verringerung der Permeabilität ausdrücken, da die Proppants in die Matrix eingebettet werden und somit der

durchströmte Querschnitt infolge einer Porenverengung kleiner werden würde. Zudem würde man eine Veränderung der Oberflächen des Gesteins nach dem Ausbau des Tools feststellen. Anhand der Ergebnisse der Versuche sollen dann Entscheidungen getroffen werden, ob der Einsatz von Stützmitteln in einer beliebigen Bohrung eine mögliche Option ist, um vorhandene Klüfte offen zu halten.

Untersuchung zur Produktionserhöhung in Schiefergas-Reservoirs

Aus den Ergebnissen der Analyse resultiert die Erwartung, dass auf nahezu allen Kontinenten eine bedeutende Anzahl von unkonventionellen Erdgaslagerstätten – so in Europa u. a. in Polen, Frankreich, Großbritannien und Deutschland – existiert. Die größten unkonventionellen Gasfelder sollen demnach in China und in den USA liegen. Technologische Fortschritte und in den letzten Jahren anhaltend hohe Energiepreise machen unkonventionelle Lagerstätten wirtschaftlich zunehmend attraktiver. Mit Hilfe von Simulationsmodellen muss die zu erwartende Effektivität verschiedener Fördertechnologien in Schiefergas-Reservoirs untersucht werden.

Verbundprojekt OPTIRISS

An einem An-Institut der TU Bergakademie, dem DBI-Gastechnologisches Institut (DBI-GTI), wird gemeinsam mit dem Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg das Verbundprojekt OPTIRISS, Optimale Rissbildung in Petrothermie-Gesteinen, bearbeitet. Gemeinsam mit Forschungspartnern aus Jena und Weimar wird im Auftrag der Bundesländer Sachsen und Thüringen ein optimales Prognosetool für Petrothermie-Investoren entwickelt, mit

dem – ähnlich wie in Abb. 2 skizziert – Modellmethodiken für eine energieeffiziente Ausgestaltung der unterirdischen Geowärmetauscher für Petrothermie-Kraftwerke bereitgestellt werden. Dabei werden geologische, geomechanische, bohrlochhydraulische und energietechnische Simulationskomponenten miteinander verknüpft, – solche, die für Investitionsentscheidungen bei sächsischen und thüringischen Petrothermie-Projekten angesetzt werden können. Alle diese F/E-Aktivitäten sind Bausteine eines Tools, das dazu dient, künftige Fracking-Maßnahmen zuverlässiger kalkulierbar zu machen.

Literatur

- Autorenteam: Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Risikobewertung. Studie FKZ 371123299, FG II. 2.1 im Auftrag des Umweltbundesamtes Dessau-Roßlau, Aug. 2012.
- Autorenteam: Oberflächennahes Erdgas - Der Mythos vom brennenden Wasserhahn. Erdöl-Erdgas-Kohle, 127. Jg. 2011, H. 6, S. 473.
- Autorenteam: Geologische Vorausschätzungen und technisch-wirtschaftliche Durchführbarkeit von Shale Gas-Projekten in Deutschland und Polen. Studie DBI GUT Freiberg, Juni 2012.
- Autorenteam: Hintergrundpapier zur Stimulation geothermischer Reservoirs. GtV Bundesverband Geothermie, Berlin 2011.
- Autorenteam: Denkschrift FRACKING. Geokompetenzzentrum Freiberg, April 2012, 9 S.
- ExxonMobil Production Deutschland GmbH, Bohren nach Erdgas und Erdöl, Auf der Suche nach heimischen Lagerstätten, 08/2009
- Reinicke, K. M.: Unkonventionelles Gas - Wo liegen die Herausforderungen? Erdöl-Erdgas-Kohle, 127. Jg. (2011) H. 10.
- Reinicke, K. M.: Fracken in Deutschland. Erdöl-Erdgas-Kohle, 128. Jg. (2012) H. 1.
- Kaltwang, H. J.: Flözgasgewinnung aus der saarländischen Steinkohlenlagerstätte durch Übertagebohrungen. Erzmetall 48 (1995) Nr. 9, S. 660-668.
- Teichmüller, Maik: Investigation on proppant agent selection for hydraulic fracturing in deep gas wells, Northern Germany. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau, 2008.

Das Bündnis ibi: Innovative Braunkohlen-Integration



From Mining To Refining
Innovative Process Technology

Carsten Drebenstedt, Martin Pfitze

Im Rahmen eines vom BMBF geförder- ten Innovationsforums haben sich 2008 speziell im Umfeld bestehender Chemie- parks regional verwurzelte, einschlägige Unternehmen zusammengefunden, die neue Wege der komplexen stofflichen Nutzung von Braunkohlen erschließen wollen. Im Verbund werden sie erfolg- reich sein – dann, wenn es gelingt, die Ketten von Prozessschritten ab Lager- stätte über die Gewinnung und Aufbe- reitung hin zur stofflichen Weiterver- arbeitung und -veredelung (Extraktion, katalytische Spaltung, Vergasung) zu optimieren und schlüssig miteinander zu vernetzen. Unter dem Primat der Wirtschaftlichkeit sollen unter anderem die „zur Entsorgung“ (u. a. zur Deponie- rung) verbleibenden Reststoffmassen minimiert und die Umweltbelastungen reduziert werden. Dazu wird es teilwei- se notwendig sein, völlig neue Techno- logien, Anlagen und Verfahrenszüge zu entwickeln und perfekt aufeinander ab- zustimmen.

Das heute bereits als lokaler Wachs- tumskern fungierende Bündnis „ibi“ baut auf dem gleichnamigen Innovations- forum auf, das 2008 bis 2009 ebenfalls schon vom BMBF gefördert worden war. Mit insgesamt mitteldeutschen 13 Insti- tutionen – zehn Unternehmen und zwei Hochschulen – ist das Bündnis dabei, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass progressive, effiziente Technologien zur stofflichen Verwertung der Braun- kohlen, von denen in vielen Weltregio- nen beachtliche Vorratsmengen nachge- wiesen sind, entwickelt und – vor allem auch – überregional vermarktet werden können. Das geschieht angesichts dreier Gegebenheiten: 1. der unsicheren Ver- sorgungslage bei Erdöl und Erdgas, 2. der zunehmenden Volatilität der Preise auf den Öl- und Gasmärkten und 3. der Tatsache, dass die Nachfrage der che- mischen Industrie nach großvolumigen Kohlenwasserstoffquellen noch lange anhalten wird.

Obleich dem Bündnis erfahrene, leistungsfähige Unternehmen sowie re- nommierte Hochschulen mit traditionell auf den in Rede stehenden Feldern for- schenden Fakultäten und ausgewiesenen Experten angehören, sind auch weiter-

hin noch ganz erhebliche Forschungsan- strengungen angesagt, die notwendiger- weise getätigt werden müssen, um in der anvisierten Richtung voranzukommen. Entsprechende Verbundvorhaben sowie strategisch wichtige Weichenstellungen und Maßnahmen werden in den Jahren bis 2014 dazu beitragen, die noch fehlen- den bzw. noch nicht vollends optimierten Methoden und Technologien weiterzu- entwickeln und auf das Niveau der in- ternationalen Wettbewerbsfähigkeit zu heben.

Im Fokus der Bemühungen des Bünd- nisses „ibi“ stehen Verfahrenswege, auf denen Kohle in wichtige Grundchemika- lien (z. B. in Wachse, Aromaten, Olefine) konvertiert werden kann: in die Aus- gangssubstanzen für die Herstellung von Veredelungsprodukten wie Plaste, Elasten, Farben und nicht zuletzt auch Arzneimitteln. Die chemische Industrie ist deutschland- und weltweit Basis zahl- reicher, vielstufiger Wertschöpfungspro- zesse in praktisch jeder Volkswirtschaft und hat eine dementsprechend hohe Bedeutung für Wohlstand und Beschäf- tigung.

Die Partner aus zunächst zwei Bun- desländern (Sachsen-Anhalt und Sach- sen) bündeln Kompetenzen dreier Bran- chen: Braunkohlenbergbau, Chemische Industrie und Anlagenbau (vgl. Abb. 1).

Branchenübergreifende Struktur des Bündnisses „ibi“

Gemeinsamer, erklärter Geschäfts- zweck des in Leuna ansässigen Bünd- nisses ist die stufenübergreifende Ko- operation mit dem Ziel, nachhaltigkeits- orientierte, wirtschaftlich interessante und umweltverträgliche Technologien im oben dargestellten Sinne zu entwi- ckeln und international zu vermarkten.

Die Entwicklung eines Braunkohlen- Chemieparks als Komplettanlage, wie auch einzelner neuer Verfahren (z. B. Vergasung) lässt sich kaum durch ein- zelne Unternehmen realisieren. Das größte Hindernis dabei ist die geringe Wirtschaftlichkeit der Umsetzung ein- zelner Prozessstufen. Das ibi-Bündnis wird durch die Verkettung der Prozess- stufen die Möglichkeit nutzen, stoffliche und energetische Synergien zu heben

ibi-Bündnispartner aus der Wirtschaft

- ABB Automation GmbH, Leipzig – wichtigster Systemautomatisierer von Tagebaugroßgeräten
- EPC Technology GmbH, Leuna – Spezialist für Anlagenbau
- FAM GmbH, Magdeburg – Tagebausrüster mit Spezialisierung Förder- und Haldentechnik
- InfraLeuna GmbH, Leuna – größter Chemieparkbetreiber in Ostdeutschland
- Linde Group/Linde Gas, Leuna – größtes Gaszentrum Europas
- MIBRAG mbH, Zeitz – größtes Bergbauunternehmen in Mitteldeutschland
- ROMONTA GmbH, Amsdorf – Weltmarktführer für Montanwachs
- TAKRAF GmbH, Leipzig – einer der drei Produ- zenten von Tagebaugroßgeräten in Deutschland
- IHU GmbH, Halle – FuE, Wissensmanagement, Wissenschaftliche Koordinierung, Consulting
- isw gGmbH, Halle – Consulting, Management

ibi-Bündnispartner aus der Wissenschaft

- Hochschule Merseburg (FH), Bereich Verfahren- technik/Technische Reaktionsführung
- Technische Universität Bergakademie Freiberg – Die Ressourcenuniversität:
 - Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
 - Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen
 - Institut für Markscheidewesen und Geodäsie
 - Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik

Abb. 1: ibi-Bündnispartner aus Wirtschaft und Wissenschaft

und eine nahezu rückstandsfreie Ver- wertung realisieren.

Die auf den einzelnen Forschungsfel- dern erarbeiteten Erkenntnisse werden im Forschungsverbund ausgebaut und über die Vernetzung wettbewerbsfähig gestaltet. Beispielsweise wird die bisher energetisch genutzte extrahierte Koh- le der katalytischen Spaltung bzw. der Vergasung im Interesse einer höheren Wertschöpfung zugeführt. Darin sieht das ibi-Bündnis seine weltweite Allein- stellung.

Über die Region Mitteldeutschland hinaus wird mit den im Bündnis entwi- ckelten und angebotenen Dienstleistun- gen, Verfahren und Anlagen eine zu- mindest europaweite Führungsposition angestrebt. Bei erfolgreicher Umsetzung ist derzeit davon auszugehen, dass die entwickelte Prozesskette auch weltweit einzigartig sein wird.

Quo vadis Kohlengologie?

Norbert Volkmann

In der Forschung stehen seit den 1970er- und 80er-Jahren Fragen der Vergelung mitteleuropäischer Braunkohlen, der Tektonik und der durch diese gesteuerten Rohstoffqualität sowie lagerstättengeologische Arbeiten in allen damals aktiven Revieren im Fokus. Mit der Einführung der Fluoreszenzanalyse in die petrographische Arbeit (Abb. 1) wird die Grundlage für eine verstärkt stofflich orientierte Rohstoffbewertung geschaffen – ein Arbeitszweig, der für gegenwärtig zu lösende Aufgaben von besonderem Interesse ist.

Mit zwei Projekten sind langjährige Aktivitäten verbunden. Das bezieht sich zum einen auf das Koordinierungszentrum „Neue Methoden der Braunkohlenverwertung“, ein unter Federführung des Brennstoffinstituts Freiberg existierender Verbund kohleforschender Einrichtungen der damaligen RGW-Staaten. Ziel des Zusammenschlusses war die Entwicklung eines Systems zur Kodierung von Rohstoffqualität und Veredlungseignung.

Als zweite erwähnenswerte Initiative ist ein nach klassischem Rammlerschen Vorbild geschaffener Zusammenschluss von Petrografen, Brennstoffchemikern und -verfahrenstechnikern zu nennen, dessen Ziel – analog dem des heutigen Deutschen EnergieRohstoff-Zentrums (DER) und dem Konzept der Innovativen Braunkohlen Integration in Mitteldeutschland (ibi) – in der Rohstoffauswahl und in der Verfahrensoptimierung für die stoffliche Kohlenutzung lag.

Franz Fischer, der zusammen mit Hans Tropsch 1923 die bereits um 1860 durch Berthelot „experimentell nachgewiesene, aber schlecht dokumentierte“ (zit. Fischer) Hydrierung von Kohle nachvollzog, sagt aus, dass die Anlagerung von Wasserstoff sowohl bei Braunkohle als auch Steinkohle gelingt, und zwar um so leichter, je geologisch jünger die Kohle ist. Heute sind wir in der Lage, dieses Phänomen wesentlich differenzierter zu sehen und die Eignung des Rohstoffs für die Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen mittels Verfahren der Kohlenpetrografie zu definieren. Be-

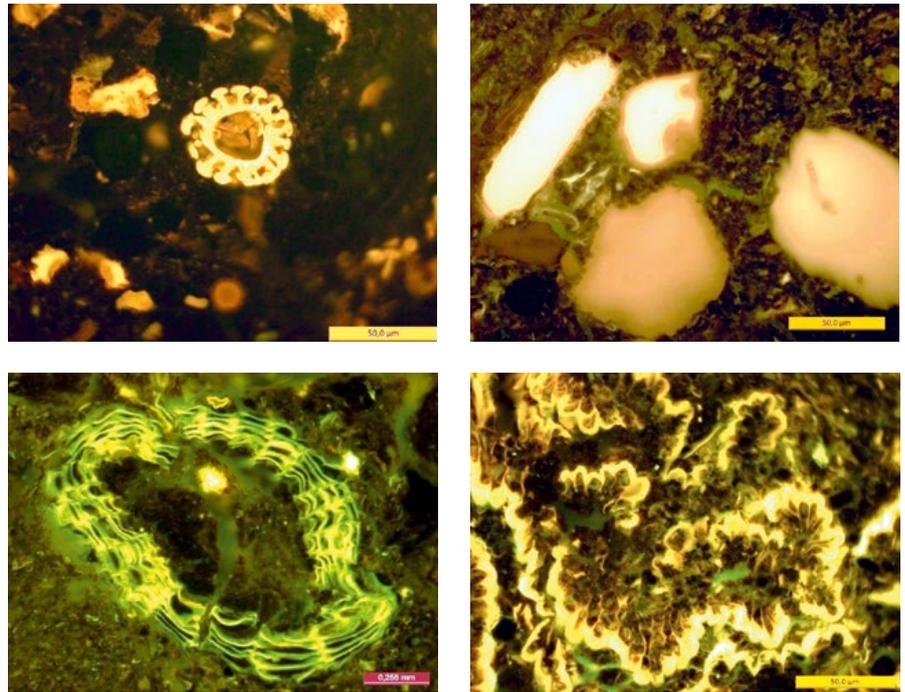
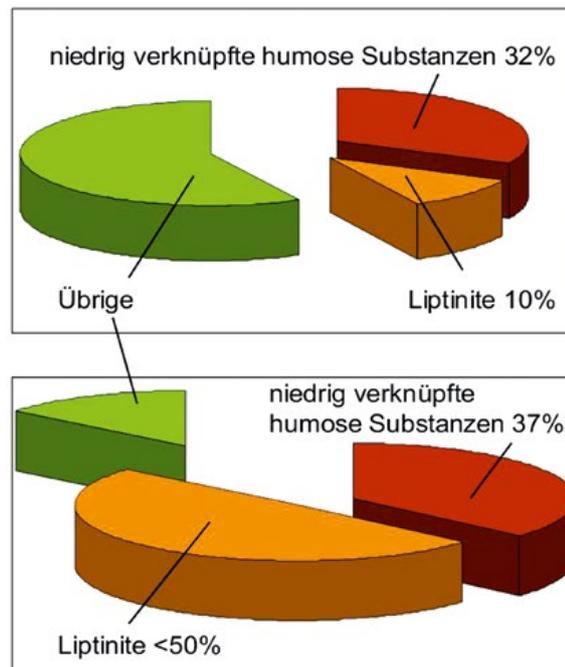


Abb. 1: Mikropetrographische Fluoreszenz-Aufnahmen von Maceralen der Liptinitgruppe aus dem mitteleuropäischen Eozän; polierte Anschnitte, Ölimmersion. Links oben: Sporinit (Illexpollenites sp.), rechts oben: Resinit, links unten: Suberinit-Wurzelquerschnitt, rechts unten: Cutinit

sonders auffallend sind die Unterschiede in der stofflichen Beschaffenheit bei Betrachtung der Flöze des mitteleuropäischen Eozäns im Vergleich zum 2. Lausitzer Flözhorizont (Miozän). Bezogen auf Lagerstättendurchschnitte ergibt sich für das Eozän ein bis zum Zweifachen höherer Anteil an carbochemisch nutzbaren Komponenten, insbesondere pflanzlichen Bitumenträgern, den Lip-

tiniten (Abb. 2). Aus der Kenntnis der besonderen stofflichen Konstitution eozäner Kohlen heraus stellt sich natürlich auch die Frage, inwieweit sich dies in kohlestämmigen Chemieprodukten widerspiegelt. Umfangreiche Arbeiten zur Hydrierung von heimischen Braunkohlen zeigen dabei, dass die Menge an gewinnbarem Flüssigprodukt bei Einsatz eozäner Braunkohlen ein deutliches



II. Miozänes Flöz (Niederlausitz)

Eozäne Flöze (Mitteldeutschland)

Abb. 2: Durchschnittliche Stoffgruppenzusammensetzung von Weichbraunkohlen zweier Reviere. Liptiniten (Bitumina) und niedrig verknüpfte humose Substanzen gelten dabei als reaktiv.

Maximum erreicht (Abb. 3). Liptinitgehalt und Ölausbeute gehen auf das Engste konform. Darüber hinaus sind Menge und Qualität des Hydrierprodukts – hier gemessen als Alkylbenzol und als aliphatische Komponenten – positiv kohärent: Hoher Ölgewinn geht einher mit guter Produktqualität, d.h. hohen Anteilen an niedrigsiedenden Kohlenwasserstoffen.

Deutlich wird, dass die stoffliche Beschaffenheit unserer Kohlen kein zufälliges Phänomen ist. Vielmehr liegt dieser ein sehr komplexer genetischer Prozess zugrunde, bei dem Paläo-Pflanzengemeinschaft, Ablagerungsbedingungen und -milieu im frühen Torfstadium in einzigartiger Weise kombiniert waren. Bezugnehmend auf die eozänen Flöze Mitteldeutschlands wird offenbar, dass die moderne Kohlenpetrologie geeignet ist, einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätsbewertung des Rohstoffs auch und

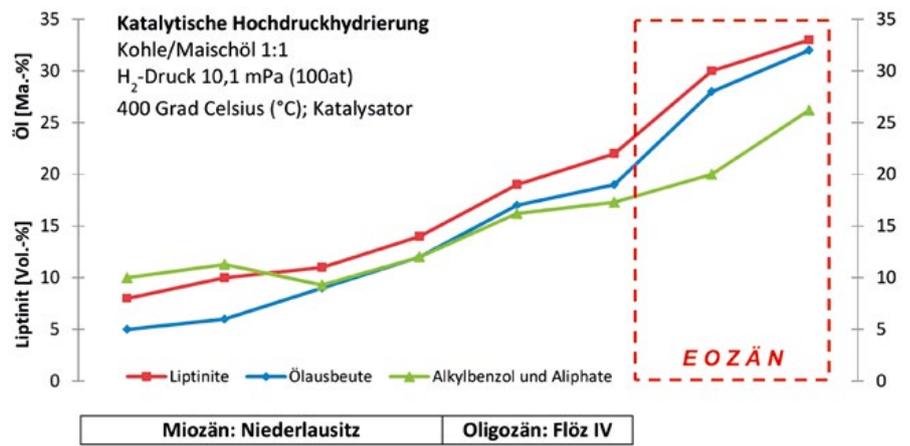


Abb. 3: Ölausbeute und -qualität in Relation zum Liptinitgehalt; Ergebnisse der katalytischen Hochdruckhydrierung (KHH) von Lagerstätten-Durchschnittsproben zweier ostdeutscher Braunkohlen-Provinzen

gerade im Sinne einer stoffwirtschaftlichen Nutzung zu leisten. Kohlengeologie darf sich nicht phänomenologisch, ausschließlich auf die Entstehung dieses

hochkomplex aufgebauten Naturstoffs beschränken. Stets muss der angewandte Aspekt unserer geowissenschaftlichen Arbeit im Fokus stehen.

Ionenzyklotron- und kernmagnetische Resonanz-Spektrometrie zur Kohleanalytik

Marius Kroll, Mirjam Schmidt, Erica Brendler, Daniela Bauer, Philipp Rathsack, Bianca Wolf und Matthias Otto

Im Hinblick auf die sich stetig verknappenden Erdölressourcen und ihre oft problematische geografische Lage richtet sich der Blick zunehmend auf die heimische Braunkohle als potenziellen Kohlenstoffträger für die chemische Industrie. Dieser Perspektive steht allerdings noch ein erheblicher Forschungsbedarf entgegen, der in der in vielen Details noch unbekanntem Zusammensetzung der deutschen Braunkohlen begründet liegt. Etliche Summenparameter, wie der Aschegehalt oder der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, können zunehmend genauer bestimmt werden, und die methodischen Arbeiten auf diesem Gebiet konzentrieren sich auf die Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Resultate sowie die Zeitersparnis bei den Analysen.

Die Bestimmung anderer Summenparameter, wie der Aromatizität, und die Analyse der molekularen Zusammensetzung von Kohlen sind noch immer eine Herausforderung für den ambitionierten Analytiker. Als Lösungsansätze hierzu werden in diesem Artikel die Festkörper-NMR sowie die ultrahochauflösende Massenspektrometrie in Form der FT-ICR-MS (Fourier-Transformations-Ionenzyklotronresonanz-Massenspektro-

metrie) vorgestellt, die im Rahmen der Arbeit des Deutschen EnergieRohstoff-Zentrums (DER) für die Strukturaufklärung von Energierohstoffen zum Einsatz kommen.

FT-ICR-MS: ultrahochauflösende Massenspektrometrie

Kohlen sind sehr heterogene Stoffmenge, die eine Vielzahl von anorganischen und organischen Komponenten aufweisen, wobei der organische Anteil mengenmäßig überwiegt. Um die organischen Bestandteile massenspektrometrisch analysieren zu können, müssen sie in aller Regel in Lösung vorliegen. Dies kann durch Extraktion von Kohle mit Lösungsmitteln, durch partiellen Aufschluss mit verschiedenen selektiv bindungsspaltenden Reagenzien sowie durch Pyrolyse geschehen. Die Pyrolyse ist ein thermochemisches Veredelungsverfahren, bei dem Kohle oder jüngere biogene Energieträger unter Ausschluss von Luft so hoch erhitzt werden, dass feste, flüssige und gasförmige Produkte anfallen, deren Zusammensetzung stark vom Einsatzstoff und von den Reaktionsbedingungen abhängt. Insbesondere die flüssigen Pyrolyseprodukte (Pyrolyse-

öle) stehen seit längerem im Fokus der Forschung. Sie enthalten eine Vielzahl chemischer Verbindungen. Das Spektrum der in Pyrolyseölen enthaltenen Substanzklassen reicht von unpolaren langkettigen Kohlenwasserstoffen bis hin zu hochpolaren Carbonsäurederivaten und bedingt somit eine große Herausforderung für die Massenspektrometrie, die – je nach experimentellem Ansatz – nur einen begrenzten Teil der in den Proben enthaltenen chemischen Verbindungen in den Proben erfassen kann. Daher ist es notwendig, durch Fraktionierung, aber auch durch eine geschickte Wahl der Ionisationsmethoden die Bandbreite an Analyten so vollständig wie möglich abzudecken, vgl. Tab. 1.

Ein Blick auf Tabelle 1 zeigt recht deutlich, dass bereits die relevante Polarität der zu analysierenden Probe (ob also die jeweils zu messenden Ionen Kationen oder Anionen sind) einen deutlichen Einfluss darauf hat, welche Verbindungen überhaupt gemessen werden können. Möchte man beispielsweise Carbonsäuren und Phenole detektieren, so gelingt dies mittels negativer Elektrospray-Ionisation (ESI). Hierbei werden durch Deprotonierung der Carbonsäuren oder

Polarität	Ionisationsmethode	Einsetzbar für
Positiv	ESI	Stickstoffbasen, Heterocyclen
Negativ	ESI	Carbonsäuren, Phenole
Positiv	APCI	Aromaten, Ester, Ether, Ketone, Heterocyclen
Negativ	APCI	Alkohole, Carbonsäuren und Phenole
Positiv	MALDI	Stickstoffbasen, Heterocyclen
Negativ	MALDI	Carbonsäuren, Phenole
Positiv	LDI	hochkondensierte Aromaten
Negativ	LDI	hochkondensierte Aromaten

Tab. 1: Für die ultrahochauflösende Massenspektrometrie geeignete Ionisationsmethoden

ESI: Elektrospray-Ionisation

APCI: chemische Ionisation bei Atmosphärendruck

MALDI: matrixassistierte Laser-Desorption/Ionisation

LDI: Laser-Desorption/Ionisation

Phenole negativ geladene Ionen erzeugt, die vermessen werden können. Verwendet man dazu ein hochauflösendes Massenspektrometer, wie das verfügbare 15 Tesla FT-ICR-MS des DER, so kann man Summenformeln aus den gemessenen Masse-zu-Ladung-Verhältnissen ableiten. Die mit diesem Gerät erreichten Auflösungen sind größer als 300.000, was bedeutet, dass Signale von Spezies, deren Masse sich um die eines Elektrons unterscheiden, noch spektral aufgelöst werden können.

Funktionsweise

Die FT-ICR-MS ist eine Ultrahochleistungsanalysenmethode, die zurzeit die höchste Auflösung aller verfügbaren Massenspektrometriemethoden offeriert. Sie wurde von Comisarow und Marshall entwickelt und erstmals 1974 publiziert. Die Funktionsweise des FT-ICR-MS beruht auf der Bestimmung der Zyklotronfrequenz von Ionen, die in einem homogenen Magnetfeld mittels elektrischer Felder eingesperrt werden. Unter solchen Bedingungen werden die Ionen durch die permanent wirkende Lorentzkraft auf eine Kreisbahn gezwungen, auf der sie mit ihrer Zyklotronfrequenz f umlaufen. Hierbei ist die Zyklotronfrequenz direkt proportional zur Ladung des Ions z und zur magnetischen Feldstärke B sowie indirekt proportional zur Masse des Ions m .

$$f = \frac{zB}{2\pi m} \quad (1)$$

Durch das Umformen von Gleichung (1) erhält man als Ergebnis schließlich das gewünschte Masse-zu-Ladungs-Verhältnis.

$$\frac{m}{z} = \frac{B}{2\pi f} \quad (2)$$

Moderne FT-ICR-MS-Geräte besitzen sehr starke Magneten, die aus suprareitenden Spulen aufgebaut sind und über ein konstantes, homogenes Magnetfeld verfügen. Folglich ist $B/2\pi$ konstant, und man erhält das gesuchte m/z -Verhältnis durch Einsetzen der ermittelten Zyklotronfrequenz f in Gl. (2). Die Zyklotronfrequenz f der umlaufenden Ionen kann jedoch nicht direkt gemessen werden, sondern wird aus einer zeitabhängigen Messung induzierter Bildströme abgeleitet. Dies geschieht in der Messzelle, in der vier Kondensatorplatten ringförmig angeordnet sind. Jeweils zwei gegenüberliegende Platten werden miteinander verschaltet und bilden somit das Anregungs- und Detektorplattenpaar. Durch Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes geeigneter Frequenz an das Anregungsplattenpaar können die in Phase umlaufenden Ionen auf einen höheren Orbit angeregt werden und passieren somit das Detektorplattenpaar in einem geringeren Abstand als im nicht angeregten Zustand, was eine Verstärkung des induzierten Bildstroms zur Folge hat. Diese Bildströme werden aufgezeichnet und mittels Fourier-Transformation (FT) in die Frequenzdomäne umgewandelt. Die somit erhaltene Frequenz entspricht der gesuchten Zyklotronfrequenz und ergibt, eingesetzt in Gl. (2), den gesuchten m/z -Wert. Die Besonderheit dieser Detektionsart ist, dass die Ionen nicht zerstört werden und somit mehrfach gemessen werden können.

Kopplung von Hochleistungstrennmethode mit FT-ICR-MS

Kombiniert man bei der Analyse von Pyrolyseölen nun das Auflösungsvermögen des FT-ICR-MS mit einer relativ unspezifischen Trennmethode, wie z. B. der Größenausschlusschromatografie, so erhält man eine sehr leistungsfähige Kopplung, die eine Reihe von Vorteilen mit sich bringt. Dazu zählt unter anderem, dass Probebestandteile, die sich negativ auf die Ionisierung auswirken, gegebenenfalls chromatografisch abgetrennt und somit intensivere Analytsignale gemessen werden können. Die Retentionszeit liefert eine weitere Datendimension zur Charakterisierung der Analyten. Im folgenden Beispiel (s. Abb. 1) wurde die Größenausschlusschromatografie mit der FT-ICR-MS gekoppelt. Das Massenspektrometer war mit einer ESI-Quelle ausgerüstet. Die Spektren wurden mit negativer Polarität aufgenommen, sodass Substanzen, die über Protonen verfügen, detektiert werden konnten. In dem Spektrochromatogramm sind die Zeit auf der x-Achse in Minuten und das m/z -Verhältnis auf der y-Achse aufgetragen. Die Signalintensität ist farblich von niedrig (dunkelblau) bis hoch (rot) kodiert.

In Abb. 1 kann man gut die Wirkungsweise der Gelchromatografie erkennen. Ihr Prinzip beruht auf der Trennung der Spezies nach deren hydrodynamischem Volumen, das mit der Molekülmasse korreliert. Zuerst eluieren voluminöse Moleküle, die zugleich auch die höchsten m/z -Verhältnisse aufweisen, gefolgt von den stetig kleiner werdenden Molekülen geringerer Masse. Für ein bestimmtes m/z -Verhältnis (Abb. 2, rechtes Bild), lässt sich jeweils das zugehörige Elutionsprofil (Abb. 2, linkes Bild) isolieren.

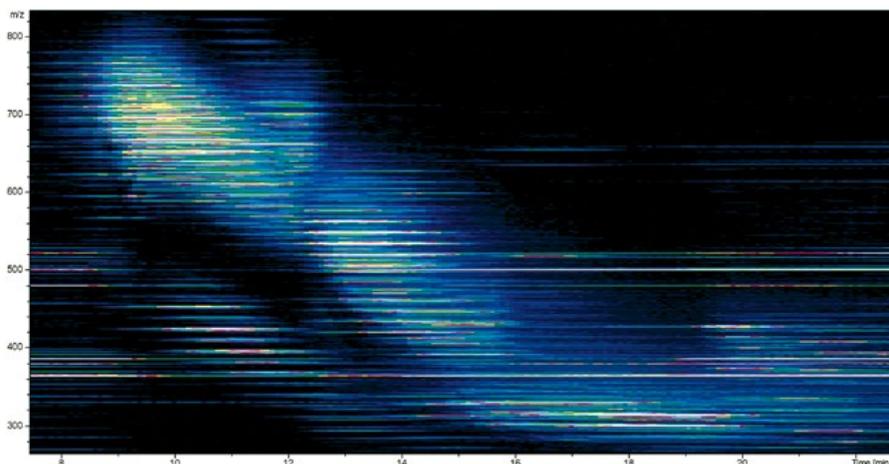


Abb. 1: GPC(-)ESI-FT-ICR-MS Spektrochromatogramm eines Pyrolyseöls

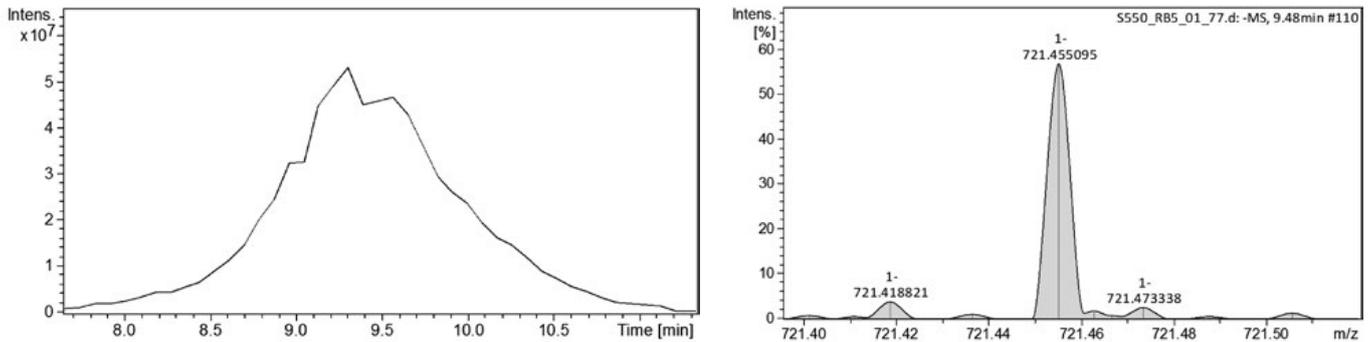


Abb. 2: Schnitte aus dem Spektrochromatogramm in Abb. 1. Links: Chromatogramm bei der Masse 721,455095 Da; rechts: Ausschnitt aus dem Massenspektrum bei einer Retentionszeit von 9,48 min.

Ist die Substanz bekannt und als Standard verfügbar, so kann man nach Kalibration die Spezies-Konzentration anhand der Fläche des Elutionsprofils bestimmen.

NMR-Spektroskopie

Die Kernresonanzspektroskopie (NMR) erlaubt die Untersuchung verschiedener Atomkerne in Kohlen und Biomassen. Neben den routinemäßig untersuchten ¹H- und ¹³C-Isotopen eignen sich dazu bei Energierohstoffen beispielsweise auch die ¹⁵N-Isotope. Bei der Messung wird die Kohleprobe einem sehr starken Magnetfeld ausgesetzt, wobei sich die entarteten Energiezustände der Atomkerne entsprechend ihrer magnetischen Kernspinzquantenzahl in sog. Zeeman-Niveaus aufspalten, zwischen denen durch Einstrahlung von Radiofrequenzstrahlung Energieübergänge angeregt werden können. Bei der Rückkehr der Kerne in den Grundzustand wird in der Detektorspule eine Magnetisierung induziert, die als Free Induction Decay (FID) aufgezeichnet wird. Durch eine Fourier-Transformation dieses Signals erhält man die für die enthaltenen chemischen Umgebungen charakteristischen Resonanzfrequenzen und stellt diese – bezogen auf eine Referenzsubstanz des untersuchten Atomkern-Isotops – als chemische Verschiebung δ dar.

Da die ¹³C- und ¹⁵N-Isotope eine geringe relative Häufigkeit besitzen und die NMR-Spektroskopie allgemein eine relativ niedrige Nachweisempfindlichkeit besitzt, müssen viele solcher Messungen akkumuliert werden, um ein gutes Signal/Rausch-Verhältnis zu erreichen. Weil Kohlen nur einen niedrigen Stickstoffanteil aufweisen und die daraus resultierend geringen Signalintensitäten die Aussagefähigkeit der

Spektren stark einschränken, konzentriert sich die Anwendung der NMR auf Kohleproben im DER-Projekt vorerst auf den Kohlenstoff.

Der Grund, warum NMR-Spektroskopie in der Strukturaufklärung unabdingbar geworden ist, liegt in der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz eines Kerns von dessen chemischer Umgebung. Bei Untersuchung einer Einzelverbindung entstehen somit klar definierte, für die jeweiligen chemischen Umgebungen charakteristische Signale, deren Anzahl und Intensität den nichtäquivalenten Kohlenstoff- oder Wasserstoffkernen im Molekül entspricht. Desweiteren ist es mit der Methode möglich, die Verknüpfungen der einzelnen Strukturelemente untereinander zu analysieren.

Bei der Anwendung der NMR auf Festkörper ergeben sich im Vergleich zu Flüssigproben drei hauptsächliche Probleme:

1. Die Anisotropie der chemischen Verschiebung und der dipolaren Wechselwirkungen wird nicht mehr durch die Moleküleigenbewegungen ausgemittelt, wie dies in flüssiger Phase geschieht. Infolgedessen entstehen breite, komplexe Linienformen. Die anisotropen Anteile der Wechselwirkungen werden deshalb durch Magic Angle Spinning (MAS) – Rotation der Probe um einen Winkel von 54,44° relativ zum angelegten statischen Magnetfeld – vollständig oder teilweise ausgemittelt.

2. Direkte dipolare Wechselwirkungen sorgen insbesondere in der ¹H-NMR für Signalverbreiterungen. Diese können größtenteils ebenfalls durch MAS beseitigt werden, ggf. in Kombination mit Methoden wie CRAMPS (Combined Rotation and Multiple Pulse Spectroscopy) oder FSLG-Entkopplung (Frequency Shifted Lee Goldberg).

3. Aufgrund der langsamen Relaxa-

tionsprozesse können bei direkter Beobachtung der ¹³C-Isotope – trotz erheblichen Zeitaufwands – nur Spektren mit vergleichsweise geringer Signalintensität erhalten werden. Diesem Nachteil kann in der ¹³C-NMR durch die Kreuzpolarisation (Cross Polarization, CP) begegnet werden. Bei der CP wird das wesentlich häufigere und empfindlichere ¹H-Isotop angeregt und dessen Magnetisierung anschließend innerhalb einer definierten Kontaktzeit τ_{CP} auf die benachbarten ¹³C-Isotope übertragen. Die Signale werden dadurch verstärkt; außerdem ist die für die Experimentwiederholung bestimmende Relaxationszeit der ¹H-Isotope viel kürzer, sodass sich der Zeitaufwand für die Aufnahme eines Spektrums um eine Größenordnung reduziert.

Der enormen Messzeitersparnis steht jedoch eine ungleichmäßige Signalverstärkung gegenüber. Die Signale der an Wasserstoff direkt gebundenen Kohlenstoffatome (oft aliphatisch) werden deutlich mehr verstärkt als die quartärer Atome (eher aromatisch), zu denen die Magnetisierung eines Protons über einen größeren Abstand übertragen werden muss. Im auf maximale Signalintensität optimierten ¹³C-Spektrum von Kohlen werden somit die aliphatischen Signale deutlicher verstärkt als die aromatischen (vgl. Abb. 3, Abb. 4), die quantitative Information wird also verfälscht.

Hinzu kommt, dass sehr hohe MAS-Rotationsfrequenzen, die man zum Ausmitteln der oben genannten Wechselwirkungen nutzt, auch die für die Magnetisierungsübertragung notwendige direkte Dipolwechselwirkung reduzieren, wodurch insbesondere aromatische C-Atome an Signalintensität verlieren.

Weiterhin erschweren paramag-

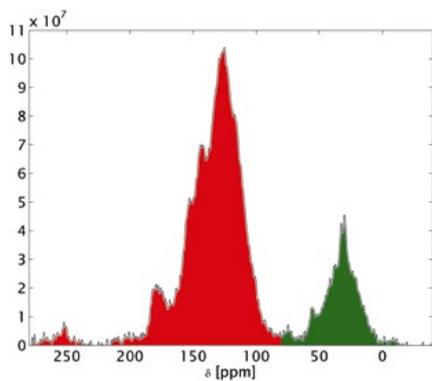


Abb. 3: North Dakota APC, SP-MAS, Experimentwiederholzeit: 30 s, 30° Puls; rot: aromatische und Carbonyl-Kohlenstoffatome, grün: aliphatische Kohlenstoffatome

netische Verunreinigungen in den Kohlen (beispielsweise Übergangsmetallkationen) die Quantifizierung der Strukturelemente. Eine halbquantitative Auswertung ist hingegen sehr gut möglich.

Für die Untersuchung von Kohleproben mittels NMR im DER-Projekt wurden zunächst diverse Methoden für das ^{13}C -Isotop erprobt. Hierunter zählt zum einen die Direktanregung, Single Pulse (SP)-MAS (Abb. 3), die pro Probe Messzeiten im Bereich mehrerer Tage erfordert. Alternativ wurden Testmessungen mit der CP-MAS durchgeführt (Abb. 4, für maximale Signalverstärkung optimierte Bedingungen), wobei sich die Messdauer hier auf einige Stunden beschränkt. Die erwähnte Intensitätsverfälschung zeigt sich deutlich im Spektrenvergleich und spiegelt sich in Größen wie der Aromatizität f_a wider, die sich aus dem Verhältnis der Intensität der Signale aromatischer Kohlenstoffatome (165–90 ppm) zur Gesamtintensität aliphatischer und aromatischer Strukturen berechnet. So beträgt diese beispielsweise bei der Argonne-Premium-Kohle „North Dakota Beulah Zap“ 0,80 (siehe Abb. 3); aus der exemplarisch dargestellten CP-Messung würde sich ein Wert von 0,47 ergeben.

An diesen Zahlen erkennt man die Problematik, die bei der Findung einer „wahren“ Aromatizität für eine Kohle besteht. Literaturangaben für häufig untersuchte Proben aus Kohleprobenprogrammen sind folglich sehr heterogen, weichen stark voneinander ab und stellen – je nach verwendetem NMR-Spektrometer und Methoden-/Parameterwahl – lediglich Momentaufnahmen dar.

Es existieren verschiedene Lösungs-

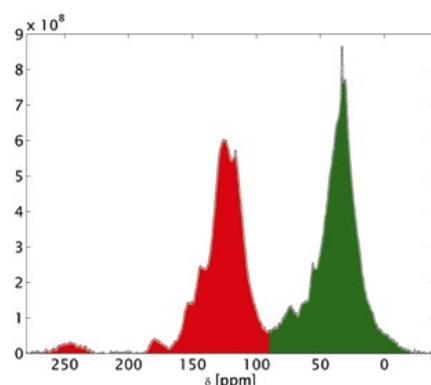


Abb. 4: North Dakota APC, CP-MAS, $\tau_{\text{CP}} : 250 \mu\text{s}$ (maximale Signalverstärkung), Farbgebung wie Abb. 3.

ansätze für die Quantifizierung der Kohlestrukturgruppen. Die quantitativ zuverlässigsten Daten können mit der SP-MAS erhalten werden, jedoch um den Preis langer Messzeiten und mit einem trotzdem geringen Signal-Rausch-Verhältnis. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich der Einfluss paramagnetischer Zentren bei dieser Methode kaum auswirkt.

Zum anderen kann man die CP-NMR modifizieren. Beispiele hierfür sind spezielle Pulssequenzen zur Unterdrückung von Rotationsseitenbanden (TOSS), die durch unvollständige Ausmittelung der Anisotropie der chemischen Verschiebung entstehen. Neben dem besseren quantitativen Ergebnis erlaubt die Methode auch die Verwendung kleinerer Rotationsfrequenzen und damit größerer Rotoren mit mehr Probenvolumen. Damit steigt die Anzahl spektroskopierbarer C-Atome und somit die Intensität des Signals, was wiederum den Messzeitaufwand reduziert.

Die Quantifizierbarkeit kann weiterhin durch Methoden wie RAMP-CP verbessert werden. Hierbei wird während der Kontaktzeit die Sendeleistung für einen der beteiligten Kerne variiert, was eine gleichmäßigere Anregung des Spektrums ermöglicht.

Bei jeder CP-Messung ist die Kontaktzeit eine entscheidende Größe. Ist sie zu kurz gewählt, wird die Übertragung der Magnetisierung von ^1H auf ^{13}C unvollständig. Ist sie zu lang gewählt, relaxieren die angeregten Kernspins, ehe es zur Detektion kommen kann. Die Geschwindigkeiten für die Kreuzpolarisation sowie die Relaxation sind stark von den strukturellen Gegebenheiten in der Probe abhängig. Eine Analyse

der Signalintensitäten in Abhängigkeit von der Kontaktzeit kann also zusätzliche wertvolle Aussagen liefern, zur quantitativen Kalibrierung der Methode genutzt werden und den Anwender bei der Findung der wahren Aromatizität unterstützen. Literaturuntersuchungen zeigten, dass Messungen mit RAMP-CP bei längeren Kontaktzeiten von 10 ms für organische Moleküle die quantitative strukturelle Zusammensetzung der Proben sehr gut wiedergeben [1]. Die so erhaltenen Aromatizitäten lagen für die bereits erwähnte Argonne-Premium-Kohle bei $f_a = 0.69$ (TOSS) bzw. $f_a = 0.81$ (RAMP-CP), wobei zweitgenannter Wert im Rahmen des experimentellen Fehlers der mit SP-MAS bestimmten, wahren Aromatizität entspricht.

Kohleproben werden stets eine besondere Herausforderung im Bereich der Festkörper- ^{13}C -NMR-Analysen bedeuten, da ihre Bindungsstruktur völlig unregelmäßig ist und eine breite Vielfalt von spektroskopisch nicht äquivalenten Kohlenstoffatomen vorliegt. Basislinien- und Phasenkorrekturen bei der Spektrenbearbeitung sind aufgrund der Menge sich überlagernder Signale oft nur manuell möglich, was die Reproduzierbarkeit zusätzlich beeinträchtigt. Paramagnetische Zentren in unterschiedlichen Konzentrationen im Ascheanteil wie auch in der organischen Struktur selbst erschweren vergleichende Untersuchungen mehrerer Kohlen. Eine Entmineralisierung zur Entfernung der anorganischen Bestandteile wirkt sich auf die Radikaldichte in der Probe nicht immer positiv aus [2].

Die Frage nach resultierenden Veränderungen im organischen Gerüst wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Ihre Beantwortung hängt stark von den Entmineralisierungsbedingungen ab.

In einem NMR-Spektrum stecken also – bedingt durch mehrere Einflussparameter – stets erheblich mehr Informationen, als man auf den ersten Blick erkennen kann. Genau darin liegt ein großes Potenzial, das zu nutzen eine besondere Herausforderung darstellt.

Literatur

- 1 G. Metz; M. Zilio; S. O. Smith. Towards quantitative CP-MAS NMR. Solid State Nucl. Magn. Reson., 7:155–160, 1996.
- 2 B. G. Silbernagel; L. A. Gebhard; R. A. Flowers; J. W. Larsen. Demineralization effects on the EPR properties of argonne premium coals. Energy Fuels, 5:561–568, 1991.

Ansätze für den Einsatz von Sensortechnologie zur qualitätsgerechten selektiven Gewinnung in Braunkohlentagebauen

Martin Pfüte¹, Carsten Drebenstedt¹

Einleitung

Deutschland ist mit einer Jahresleistung von ca. 175 Mio. t Rohbraunkohle der mit Abstand weltgrößte Braunkohlenproduzent. Allerdings werden circa 91% der Fördermenge zur Energieerzeugung und nur ein sehr kleiner Teil stofflich genutzt. Die Technologien zur Gewinnung und stofflichen Verwertung von Kohle bergen jedoch noch ein großes Potenzial, das wesentlich durch die naturgegebene Zusammensetzung des Rohstoffs determiniert wird. Vor diesem Hintergrund ist die stofflich hochwertige bitumenreiche Braunkohle (besonders in Mitteldeutschland) für eine energetische Nutzung zu wertvoll. Die TU Bergakademie Freiberg kooperiert deshalb mit Partnern aus der Industrie im Rahmen des „ibi“-Projekts (innovative Braunkohlen-Integration). Interdisziplinäre Forschung soll Möglichkeiten zur stofflichen Nutzung der Braunkohle aufzeigen und praktikabel machen. Im Zentrum der Aktivitäten des Instituts für Bergbau und Spezialtiefbau stehen die Entwicklung eines Steuerungsprogramms für die selektive Gewinnung von Qualitätsbraunkohle sowie die einer geeigneten Sensortechnologie für die Trennflächen- und Grenzschichterkundung. Im Folgenden soll dargelegt werden, wie Sensorsysteme dafür eingesetzt werden können: die Funktionsprinzipien dieser Sensoren, Einsatz eines Sensorsystems direkt am Ausleger eines Schaufelradbaggers, um die darunterliegenden Oberflächen oder Schichten zu erkennen und zu messen, Verknüpfungsmöglichkeiten der einzelnen Technologien, die Arbeitsweise der Schichterkennung [1].

Stand der Technik bei der selektiven Gewinnung

Der Stand der Technik in der Tagebautechnologie ist auf die Massenproduktion ausgerichtet, sodass die Selektivität der Gewinnung eine geringe Rolle spielt. Aber nur eine selektive Gewinnung des Rohstoffs eröffnet die Chance einer stofflichen Nutzung mit ei-

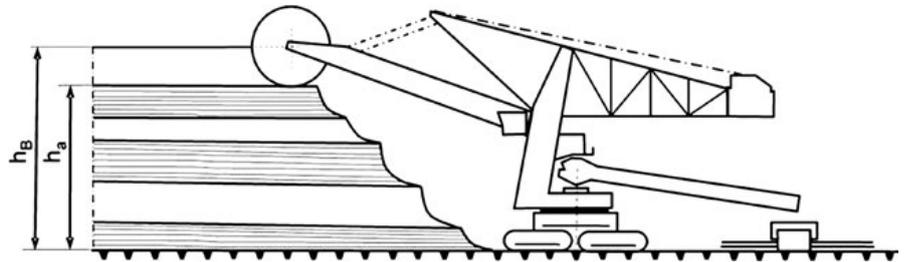


Abb. 1: Selektive Gewinnung mit Schaufelradbagger (h_B – Abtragshöhe, h_a – Aushaltshöhe) [4]

nem maximalen Zielproduktertrag. Die Selektivität der Gewinnung hängt von der Genauigkeit der Trennflächenbestimmung und der Trennschärfe ab, was ein hohes Niveau der sensorischen Erkundung voraussetzt. Beim Vergleich der Einsatzmöglichkeiten von Schaufelradbagger, Eimerkettenbagger, Continuous Surface Miner und mobiler Technik zeigt sich, dass eine genaue Abgrenzung zwischen den Geräten aufgrund ihrer unterschiedlichen Arbeitsweise sehr schwierig ist und ihre Eignung für einen selektiven Abbau insbesondere von der Mächtigkeit und der Ausdehnung sowie vom Einfallswinkel der selektiv zu gewinnenden Schicht abhängt. Dies beeinflusst wiederum den Massendurchsatz oder die Trennschärfe, die – je nach Geräteauswahl – höher oder niedriger ausfallen. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit und die geforderten Leistungen steht die selektive Kohlegewinnung mittels Schaufelradbagger/Kompaktschaukelradbagger im Vordergrund [2, 3].

Eine selektive Gewinnung von horizontal gelagerten Schichten lässt sich im Seitenblockverhieb effektiv realisieren. Dabei wird der Bagger neben der tagebauseitigen Böschung des Durchgangs verfahren, so dass er größere Strosenabschnitte scheibenweise abtragen kann. Voraussetzung hierfür ist, dass die Mächtigkeit der einzelnen voneinander zu trennenden Schichten groß genug ist, um mit dem Schaufelrad eine noch ausreichende Fördermenge zu erzielen. Die Trennung der Schichten im Blockverhieb lässt sich am besten im Terrassenschnitt erreichen, bei dem das Schaufelrad nach einem Schwenkvorgang (Schnitt) mehrmals in Verhiebsrichtung verfahren und in seiner Höhenlage nicht verändert

wird. Beim Terrassenschnitt können die Trennflächen zwischen den Scheiben so gelegt werden, dass sie dem Hangenden und Liegenden der einzelnen Schichten entsprechen. Die oberste Trennfläche darf aber nicht höher liegen als die Unterkante des Schaufelrads in seiner höchsten Stellung. Dies ist die Aushaltshöhe des Baggers (h_a , Abb. 1). Für den Betrieb des Geräts ist es wichtig, dass die maximale Höhenlage des Schaufelrads in jeder Stellung des Geräts, also auch unter einer bestimmten Geräteeinigung, erreicht werden kann [4, 5].

Optimierungsansätze

Die benötigten Sensoren müssen für den Einsatz im Bergbau grundsätzlich geeignet sein. Daher ist die Anwendung berührungsloser Messverfahren sinnvoll. Solche Sensoren haben den Vorteil, dass sie kaum gegen Verschleiß durch Abrasion geschützt werden müssen. Hierzu wurden geeignete Systeme ausgewählt, die für die zu lösenden Aufgaben praktisch in Frage kommen könnten. In diversen Versuchsreihen wurden diese Messverfahren getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass einige der getesteten berührungslosen Messverfahren für die anvisierte Problemlösung teilweise ungeeignet sind oder in bestimmten Situationen an Grenzen stoßen (Abb. 2) [6].

Für das Anwendungsfeld der Stoßkartierung haben Sensorsysteme, die auf optischen Verfahren, auf der Infrarottechnik oder auf dem Prinzip der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) basieren, vielversprechende Ergebnisse geliefert. Was den Einsatz der optischen Sensoren bzw. der Bildverarbeitungsprogramme sowie Infrarotsensoren betrifft, bestand die Idee darin, bekannte Softwaresys-

¹ Dipl.-Ing. Martin Pfüte, Prof. Dr. Carsten Drebenstedt, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

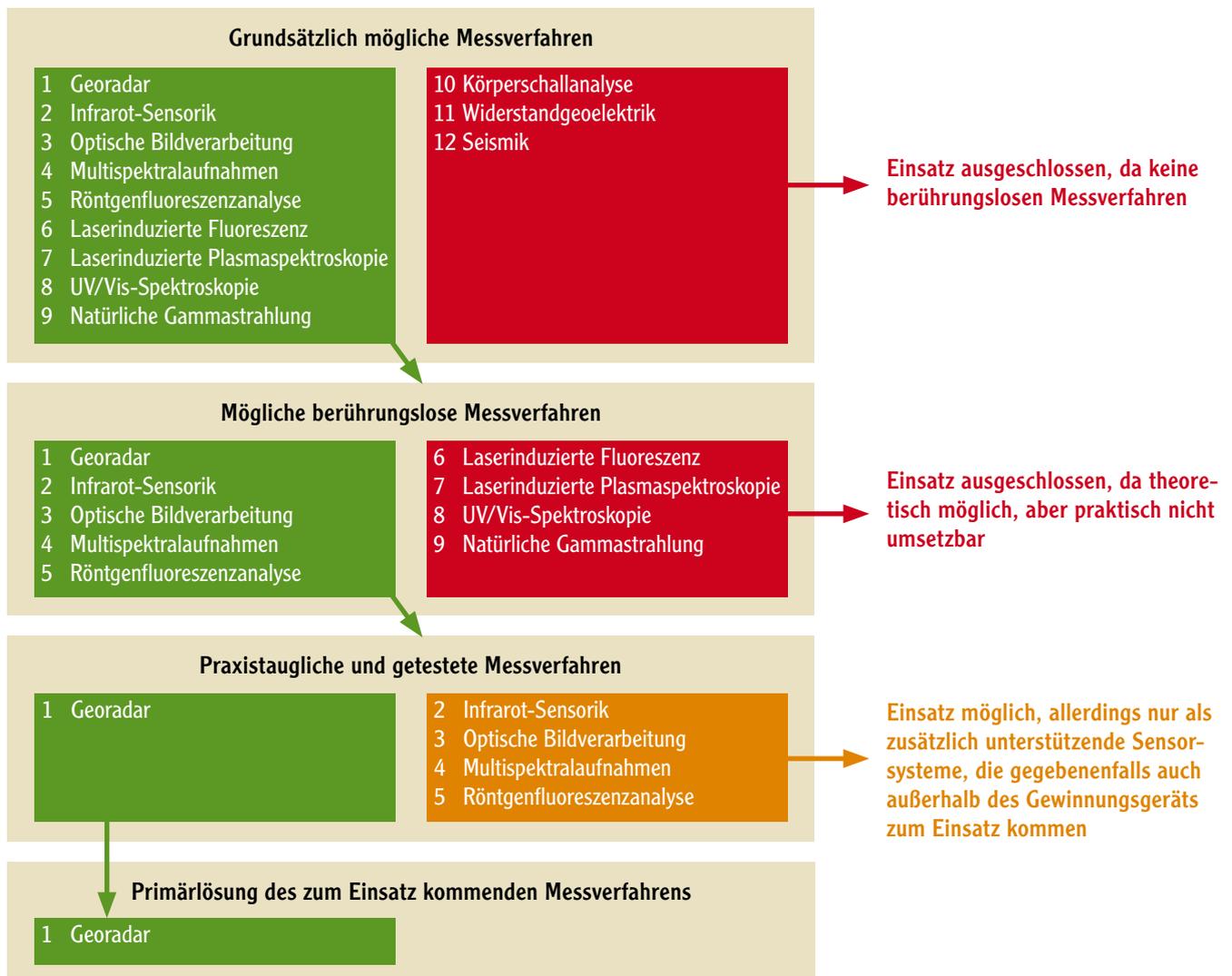


Abb. 2: Auswahlverfahren für entsprechende Sensorsysteme

teme zu nutzen, um Bilder zu analysieren und charakteristische Merkmale zu extrahieren. Die dafür ausgewählten Bildverarbeitungsprogramme und Softwaresysteme sind zwar ausgereift und können zur Erzeugung von Bildern mit deutlich sichtbaren Farbunterschieden leicht eingesetzt werden, sind jedoch grundsätzlich auf entsprechend gute Primärbilder angewiesen. Auch das RFA-Verfahren ist für die Elementanalyse und somit grundsätzlich auch für die Schichterkennung im Tagebau geeignet, sofern die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Schichten bekannt ist. Der Vergleich der Resultate aus den Feldversuchen zeigt, dass diese reproduzierbar sind, was für einen Abgleich mit den jeweiligen Schichtcharakteristiken notwendig ist. Dabei wurden jeweils 60 Punktmessungen an einer definierten Rampe im Tagebau Schleenhain vorgenommen. In einer Auswertung mit dem Bezug auf die Elemente Eisen, Schwefel, Silicium und Calcium ist deutlich gewor-



Abb. 3: Durchführung der punktgenauen RFA-Messung am Kohlestoß im Tagebau Schleenhain [8]

den, dass sich die Schichtfolge im Kohleflöz anhand von Konzentrationswerten solcher Elemente genau definieren und abbilden lässt (Abb. 3).

Das Georadar-Verfahren – ein berührungsloses und materialdurchdringendes geophysikalisches Messverfahren

– ist am besten für die Lösung der vorgesehenen Aufgabenstellung geeignet. Das Messgerät sendet elektromagnetische Wellen in den Untergrund aus, die von den Heterogenitäten im Boden und im Lockergestein reflektiert werden – infolge einer sprunghaften Änderung

der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl. Für diese sind geologische Grenzschichten, Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung oder des Feuchtegehalts verantwortlich. Die reflektierten Wellen werden von einer Antenne aufgefangen. Ihre Laufzeit, Phase und Amplitude werden von einem Analysegerät aufgezeichnet (Abb. 4).

Gezielte Versuche und Testreihen auf frei zugänglichen Flözflächen sowie direkt an einem Schaufelradbagger erbrachten positive und vielversprechende Resultate. Es war möglich, Ton sowie weitere Schichten zu differenzieren. In weiteren Testreihen soll nun die Messvorrichtung direkt am Ausleger des Baggers parallel zum Schaufelrad montiert werden, um die darunter liegenden Leitschichten zu ermitteln (Abb. 5).

Im Fazit ist die Georadartechnik am besten geeignet, Trennschichten im Kohleflöz zu ermitteln. Mittels des Georadars lassen sich tieferliegende Schichten frühzeitig erkennen und die für den Baggerführer wichtige Information über den Verlauf der jeweiligen Leitschicht ermitteln. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Georadar direkt am Gewinnungsgerät montiert werden kann, da es sehr robust ist und auch in etwas größerem Abstand zur Oberfläche noch genaue Messdaten liefert (Abb. 6) [8].

Weitere Ergebnisse und Ausblick

Die durchgeführten Situations- und Problemanalyse für die maßgebenden Sensorsysteme mündete in der Festlegung auf die Systeme, die sich für einen Einsatz zur selektiven Kohlegewinnung anbieten. Für die Stoßkartierung eignen sich optische Verfahren, Infrarotsensoren und die RFA. Diese Verfahren sind prinzipiell autark und funktionieren unabhängig vom Gewinnungsgerät. Sie sollen als Systeme zum Einsatz kommen, die die Position der betreffenden Schichtverläufe abbilden. Das Georadar erwies sich als ein für die Schichterkennung in der Tiefe geeignetes Sensorsystem. Die Zuordnung der Systeme entsprechend ihrer Eignung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Weiterhin wurde die Vorgehensweise für die Entwicklung eines Verfahrens zur sensorischen Erkennung von Schichten unterschiedlicher Kohlequalität konzipiert. In der 1. Stufe sollen mittels für die Stoßkartierung geeigneter Verfahren entsprechende Daten zu den jeweiligen Schichtverläufen erhoben werden. Die erhaltenen Daten werden als 2D-Darstellung

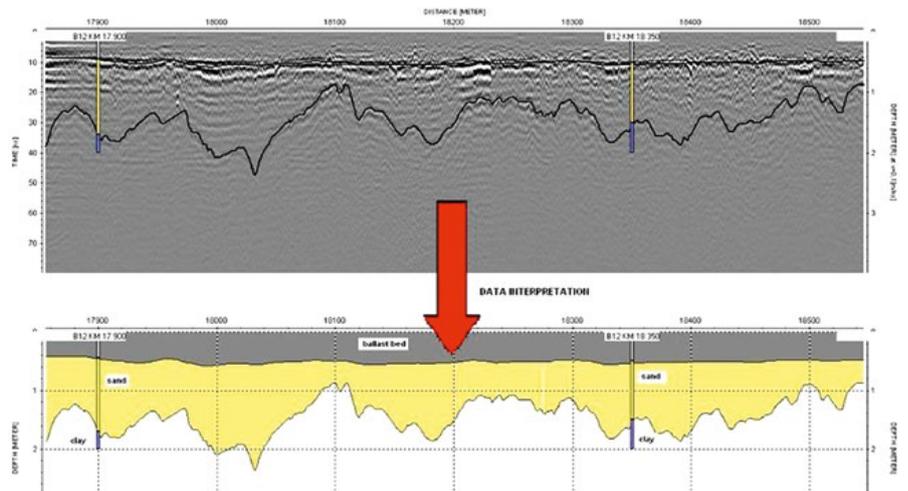


Abb. 4: Beispiel für den Einsatz des Georadars [8]

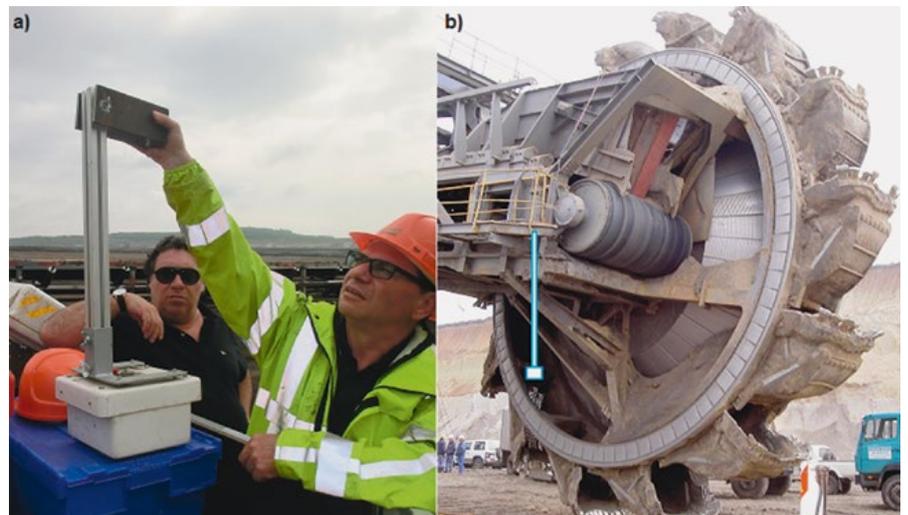


Abb. 5: Georadarantenne (a) und Halterungspunkt am Ende des Schaufelradauslegers (b) [8]

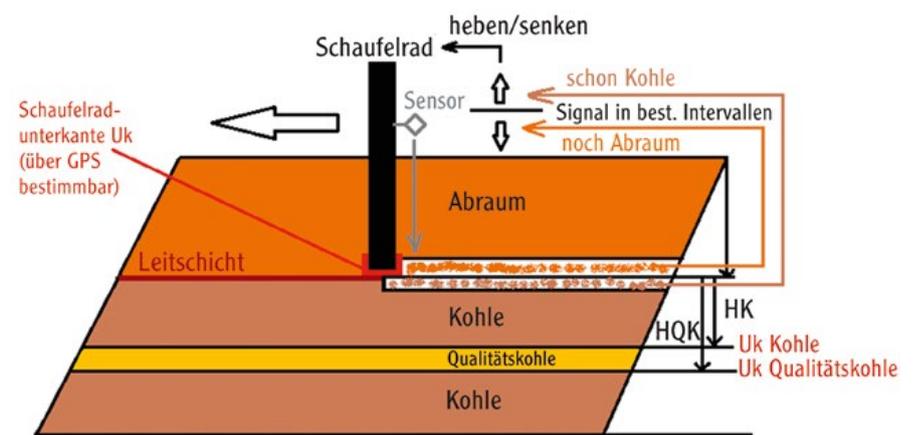


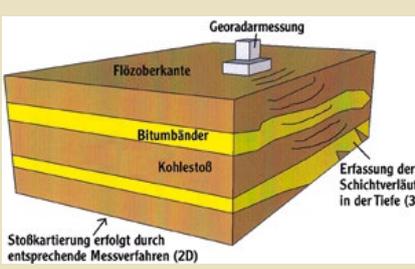
Abb. 6: Steuerung des Schaufelrads durch Georadar bei Erkennung der Leitschicht (Trennung Abraum/Kohle) [7]

lung des Kohlestoßes in das vorhandene geologische Modell transferiert, wo den einzelnen Schichten die jeweiligen x- und z-Koordinaten (für die Verhiebsrichtung und die Abbauhöhe) zugewiesen werden können. Bei Wiederholung der Messvorgänge für jeden neuen Abbaublock entsteht eine Abfolge von Darstellungen der jeweiligen Kohlestöße, die in

ihrer Summe eine zunehmende Vorhersagegenauigkeit bezüglich der einzelnen Schichtverläufe garantieren.

In einer 2. Stufe wird per Georadar die Flözoberfläche vermessen und Daten darüber gewonnen, wie sich die Schichtverläufe in Abbaurichtung fortsetzen. Auch diese Daten werden in das bereits überarbeitete und verfeinerte geologi-

Tab. 1: Unterscheidung geeignete Sensorsysteme [8]

Sensorsystem geeignet für	
Stoßkartierung (2D)	Schichterkennung (3D)
	
Optische Verfahren, Infrarotsensoren, RFA	Georadar

sche Modell übertragen, um so eine detaillierte 3D-Darstellung der zu baggern den Abbaublöcke zu erzeugen. Dabei wird den jeweiligen Schichten zusätzlich zu den durch die Stoßkartierung ermittelten x - und z -Koordinaten noch eine y -Koordinate (für die Abbaurichtung) zugewiesen. Durch dieses Verfahren kann die Veränderlichkeit der Schichtverläufe in Abbaurichtung erfasst und das geologische Ausgangsmodell, das auf Daten der Bohrerkundung basiert, nach einer geostatistischen Abweichungsanalyse noch weiter verfeinert werden.

In der 3. Stufe werden durch ein Georadar-Messgerät, das sich direkt am Gewinnungsgerät befindet und kontinuierlich während des Abbauprozesses arbeitet, ebenfalls Daten zu den einzelnen Schichtverläufen registriert und in das Modell übernommen, um Aussagen zu Schichtverläufen zu erhalten, die

aufgrund zu großer Flözmächtigkeiten durch die Oberflächenmessung der 2. Stufe nicht erfasst werden konnten. Zudem sollen die aufgezeichneten Daten dazu dienen, das geologische Modell zu verfeinern und die maßgebenden Vordersagen für die richtige Schnitteinteilung zugunsten einer selektiven Gewinnung zu definieren. Die Vorgehensweise in den einzelnen Stufen illustriert *Abb. 7*.

In den noch bevorstehenden Arbeiten kommen der technischen Ausführung und der Installation des Sensorsystems auf dem Ausleger des Schaufelradbaggers die Hauptrollen zu. Da die Ausrüstung des Gewinnungsgeräts mit dem entsprechenden Sensorsystem dazu verwendet werden soll, um das geologische Lagerstättenmodell noch weiter zu präzisieren und die Verteilung der entsprechenden Kohlenqualitäten im Tagebau online zu verfolgen.

Quellenverzeichnis

- 1 Verbundprojektbeschreibung VP2, Wachstumskern Innovative Braunkohlen Integration Mitteldeutschland - ibi, TU Bergakademie Freiberg, 2010.
- 2 Pfützte, Martin; Drebenstedt, Carsten: Actual state of technique for selective mining and materials identification. In: Continuous Surface Mining - Latest Developments in Mine Planning, Equipment, and Environmental Protection, TU Bergakademie Freiberg, 2010, page 158-164 (ISBN 978-3-86012-406-2).
- 3 Päßler, Steffen; Drebenstedt, Carsten: Berechnungsmethodik für Surface Miner (in Russisch: Методика расчета для горных комбайнов). In: Bergbau-Forum, Dnepropetrovsk, 2006, S. 26-33 (ISBN 966-350-050-6).
- 4 Stoll, Rolf Dieter; Niemann-Delius, Christian; Drebenstedt, Carsten; Müllensiefen, Klaus: Der Braunkohlentagebau - Bedeutung, Planung, Betrieb, Technik, Umwelt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 605 Seiten (ISBN 978-3-540-78400-5).
- 5 Durst, W.; Vogt, W.: Schaufelradbagger, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 1986, 391 Seiten (ISBN 0-87849-057-4).
- 6 Overmeyer; Kesting: SEMT - Sensorische Erkennung der Materialarten und Erfassung der Trennflächen, Logistics Journal, 2007 (ISSN 1860-5923).
- 7 Pfützte, Martin; Drebenstedt, Carsten: Approaches of sensor based selective mining. In: IUR - Scientific Reports on Resource Issues 2012, Volume 1, page 196-206 (ISSN 2190-555X).
- 8 Pfützte, Martin; Drebenstedt, Carsten: Approaches for a quality-controlled selective mining in German open cast lignite mines using different sensor technologies. In: Mine Planning and Equipment Selection, Vol. 2, Dresden, Germany, 2013, page 1277-1284 (ISBN 978-3-319-02677-0).

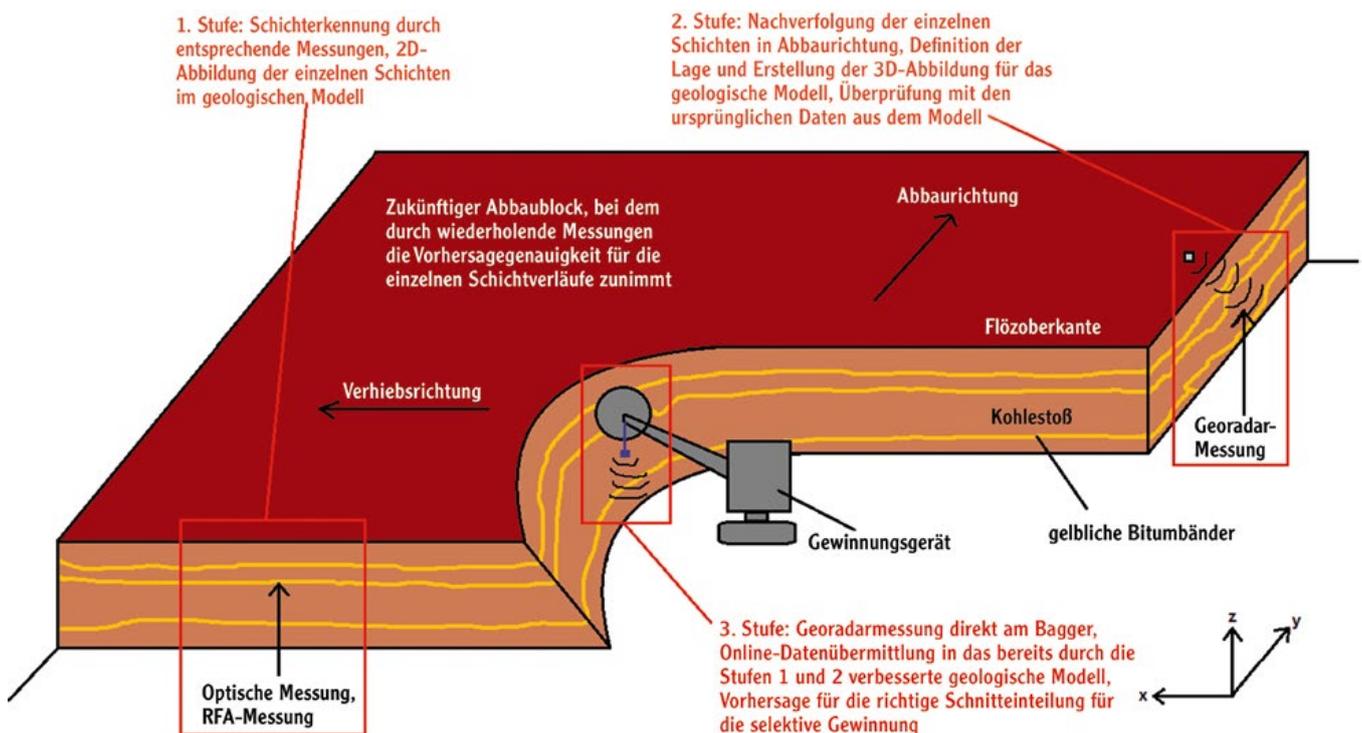


Abb. 7: Übersicht zum stufenweisen Vorgehen bei der Entwicklung eines Verfahrens zur sensorischen Erkennung von Kohlequalitätsschichten [8]

Herausforderungen und neue Lösungswege für eine nachhaltige Braunkohlenextraktion

V. Herdegen, M. Wollmerstädt, F. Fehse, H.-W. Schröder, J.-U. Repke

Einleitung

Im Hinblick auf eine zukünftige umfassende und nachhaltige stoffliche Nutzung des einheimischen Rohstoffs Braunkohle wird im Rahmen von „ibi – Innovative Braunkohlenintegration in Mitteldeutschland“ die gesamte Prozesskette der stofflichen Braunkohlenutzung (siehe Abb. 1) forschungsseitig in enger Zusammenarbeit mit den eingebundenen Industrieunternehmen aus dem mitteldeutschen Raum untersucht. Dazu wurde ein gemeinsamer Forschungsverbund ins Leben gerufen, der als Innovativer Regionaler Wachstumskern vom BMBF finanziell gefördert wird.

Im ersten und zweiten Schritt der Prozesskette werden die Modellierung der Braunkohlenlagerstätten und die darauf aufbauende selektive Gewinnung einzelner Rohstoffqualitäten betrachtet. Eng mit dem vierten Schritt der Kette, der Extraktion, ist die vorgeschaltete Aufbereitung der Braunkohle verbunden. Erst durch eine maßgeschneiderte Aufbereitung der Einsatzkohle werden neue Ansätze zur Extraktion umsetzbar. Die Montanwachsextraktion – als erster Veredelungsschritt im Sinne einer stofflichen Kohlenutzung – hat einen

wesentlichen Anteil an der Gesamtwertschöpfung. Zur vollständigen stofflichen Kohlenutzung sind im Anschluss daran thermische Konversionsverfahren anzuwenden. Durch die Niedertemperaturkonversion können aus gasförmigen Kohlenwasserstoffen Öle als Chemierohstoffe gewonnen werden. Im letzten Prozessschritt wird ein Synthesegas für eine kohlebasierte chemische Industrie erzeugt. Durch eine stoffliche und wärmetechnische Integration der einzelnen Veredelungsschritte lassen sich Synergien im Interesse eines möglichst effizienten Gesamtverfahrens in einer späteren industriellen Produktionsanlage erzielen.

Aufgrund der engen Verzahnung der Prozessstufen ergeben sich Anforderungen an die jeweils vor- bzw. nachgeschalteten Stufen. Die Anforderungen sind in Abb. 1 exemplarisch für die am Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik untersuchten Teilprojekte der Aufbereitung und der Extraktion veranschaulicht.

Das bei der heutigen großtechnischen Extraktion (Firma ROMONTA GmbH, Amsdorf) in einem Bandextraktor nach der Perkolation mit Toluol gewonnene

Rohmontanwachs setzt sich aus Wachsen, Harzen und Dunkelstoffen zusammen. Die Wachse bestehen überwiegend aus C_{24} - C_{32} -Molekülgrundketten mit funktionellen Gruppen, wie Carboxyl-, Carbonyl- und Hydroxylgruppen, die gegenüber anderen Wachsen zu einzigartigen Eigenschaften führen [1]. Zum Einsatz kommt das Montanwachs heutzutage direkt oder nach weiteren aufwendigen Aufbereitungsschritten, wie der Bleichung u. a., in der Gießereitechnik, der Papier-, der Baustoff-, der Asphalt- und in der Kosmetikindustrie bzw. als Schmiermittel.

In Anbetracht der zukünftig abnehmenden Wachs- und der ansteigenden Harzgehalte sowie wegen der qualitativen Verschlechterungen der zukünftigen Einsatzkohlen resultiert Forschungsbedarf für eine weiterhin erfolgreiche Verfahrensumsetzung. Zudem soll unter Einbeziehung einer neuartigen Aufbereitung eine Optimierung hinsichtlich der Ausbeute, der Verweilzeit und des Schüttungsverhaltens für die drei folgenden Extraktionsverfahren in systematischen Untersuchungen praktikabel werden: Perkolation, Immersion und Hochdruckextraktion.

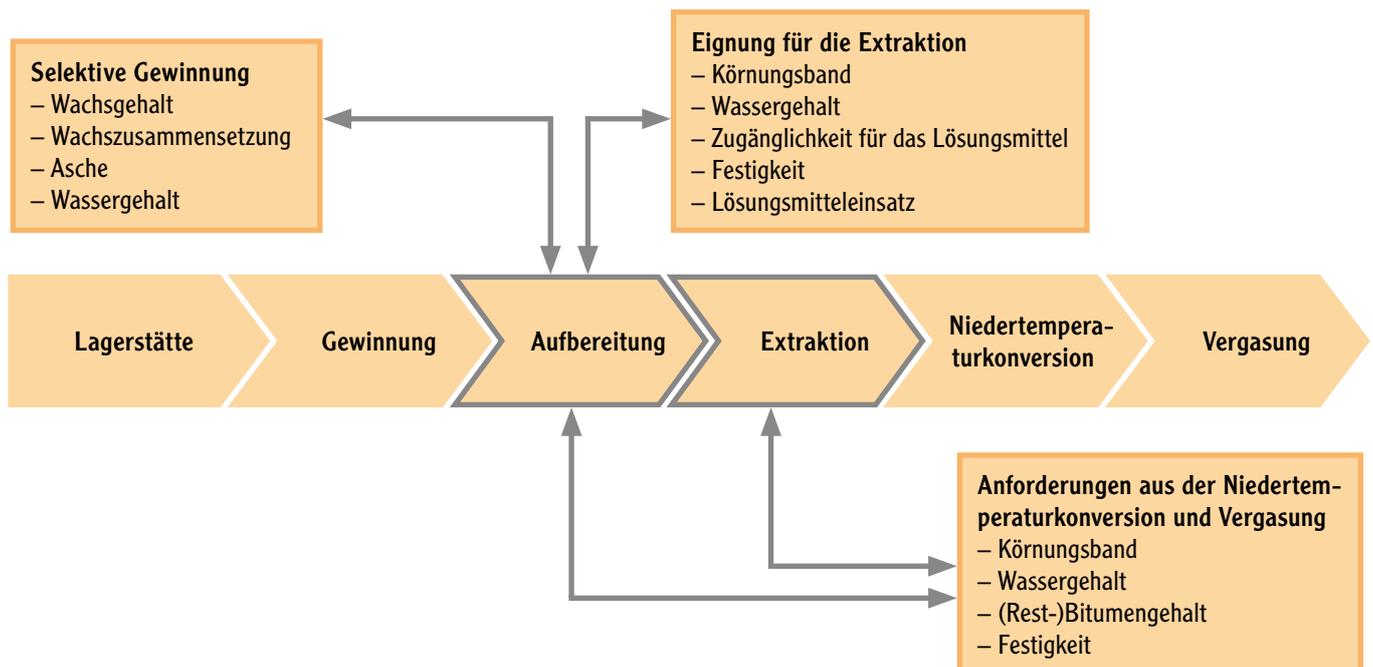


Abb. 1: ibi-Prozesskette mit exemplarischen Anforderungen aus der Aufbereitung und Extraktion in vor- bzw. nachgeschaltete Prozessstufen

Wege zu einer maßgeschneiderten Kohleaufbereitung

Die Aufbereitung der Braunkohle für die derzeitig praktizierte Extraktion erfolgt traditionell durch Grobzerkleinerung in Walzenbrechern und durch anschließende Feinzerkleinerung in Hammermühlen (HM) auf eine Körnung von $\Delta d = 6/0$ mm. Nach der anschließenden Trocknung der Braunkohle in einem Röhrentrockner auf einen Wassergehalt unter 20% und der Klassierung der Trockenkohle wird die Fraktion $\Delta d = 3/0,5$ mm direkt dem Extraktor zugeführt. Das anfallende Feinkorn ($d < 0,5$ mm) wird pelletiert und in dieser Form anschließend ebenfalls extrahiert.

Die angesprochenen rohstofflichen Veränderungen werden jedoch höhere Anforderungen an den Aufbereitungsprozess für die weitere Veredlung stellen, da sonst mit Problemen zu rechnen ist, wie beispielsweise längeren Extraktionszeiten, Schüttungsverschluss im Extraktor, Kornzerfall und geringen Wachsausbeuten bei der Extraktion der hochverdichteten Pellets.

Zukünftige Aufgabegüter sind für die Extraktion nur nutzbar, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind: enge Korngrößenverteilung für eine bessere Durchströmbarkeit der Schüttung, hohe mechanische Festigkeit, insbesondere hohe Abrieb- und Druckfestigkeit, und große spezifische Oberflächen zur besseren Zugänglichkeit des Wachses für das Lösungsmittel.

Das Ziel der Untersuchungen ist die Herstellung eines Braunkohlengranulats mit definierten geometrischen und mechanischen Eigenschaften, das den Anforderungen der drei unterschiedlichen Extraktionsverfahren genügt. Dabei ist sowohl die Herstellung eines Granulats in der Körnung $\Delta d = 3/0,5$ mm von Interesse, als auch die feinsten Granulate (Mikrogranulate) in der Körnung $\Delta d = 1/0,25$ mm. *Abb. 2* zeigt einen neuen, potenziellen Verfahrensweg für die Herstellung eines Braunkohlengranulats:

Die grobkörnige Rohkohle wird zuerst der Feinzerkleinerung unterworfen. Für die Rohkohle wurden neben der Schlag- und Prallzerkleinerung in Hammermühlen die Zerkleinerung durch Druck und Scherung in einer Lochscheibenwälmühle (LSWM) und die Zerkleinerung im Intensivmischer untersucht. Durch die Beanspruchung in der LSWM sollen die Destruktion des Kohlekorns

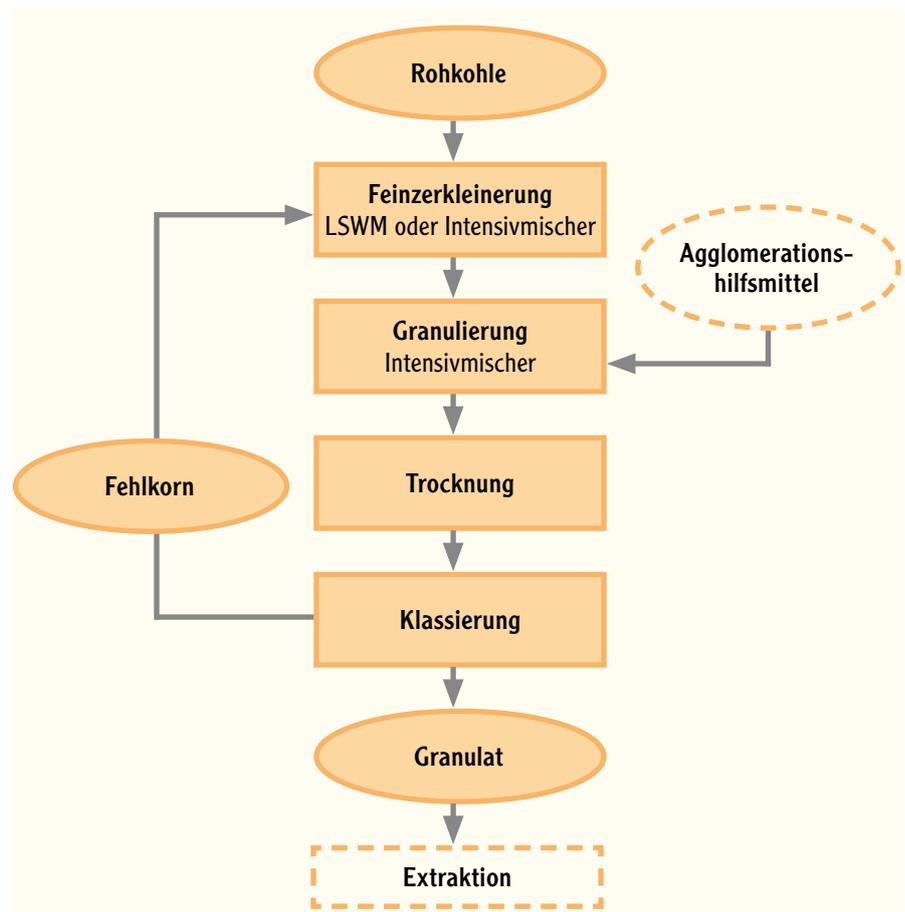


Abb. 2: Verfahrensvorschlag zur Braunkohlenaufbereitung für die Montanwachsextraktion

und eine bessere Homogenisierung des Rohstoffs erzielt werden. Die Zerkleinerung im Intensivmischer könnte eine Reduzierung des apparativen Aufwands und damit eine Senkung der Investitionskosten ermöglichen. *Abb. 3* zeigt den schematischen Aufbau der LSWM.

Die Rohkohle wird oberhalb der Koller in die LSWM eingebracht und via Einzug in den Spalt zwischen Koller und Lochscheibe zerkleinert. Die zerkleinerte Kohle wird anschließend durch die Lochscheibe aus dem Mahlraum abgeführt. Die gewählte Form der Bohrungen erlaubt eine schwache Formgebung, ohne das Zerkleinerungsprodukt maßgeblich zu verdichten. Als vielversprechende Alternative ist auch bereits die Zerkleinerung im Intensivmischer durch das rotierende Mischwerkzeug anzusehen (siehe *Abb. 4*). Anschließend wird das Produkt durch Mischeragglomeration in einem Intensivmischer unter Zugabe geeigneter Agglomerationshilfsmittel granuliert. In den Laborversuchen wurde dazu ein Intensivmischer der Firma Eirich verwendet.

Entscheidend für die Mischeragglomeration ist, dass ausreichend große Haftkräfte bei den durch die Relativ-

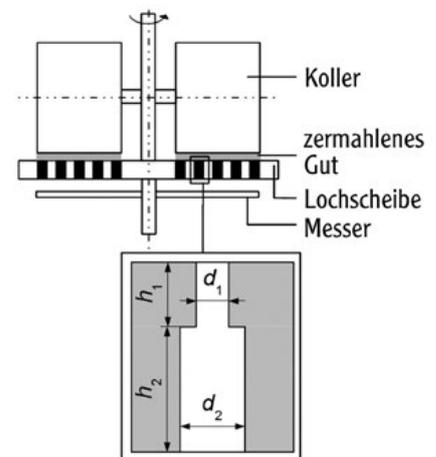


Abb. 3: Schematischer Aufbau der LSWM



Abb. 4: Intensivmischer der Firma Eirich, Typ R [2]

bewegung im Mischgut auftretenden Partikelkollisionen wirksam werden [3]. Dabei handelt es sich insbesondere um kapillare Bindemechanismen, für die die gleichmäßige Verteilung einer die Körner benetzenden Flüssigkeit erforderlich ist. Maßgeblichen Einfluss auf den Agglomerationserfolg hat die Intensität des Mischvorgangs [4]. Das Mischwerkzeug ist als Sternwirbler ausgeführt. Die Umfangsgeschwindigkeit u_w kann in sechs Stufen zwischen $6,5 \text{ m s}^{-1}$ und 37 m s^{-1} variiert werden. Als Agglomerationshilfsmittel kann flüssiges oder dampfförmiges Wasser in unterschiedlichen prozentualen Anteilen a_D zum Einsatz kommen. Da die Granulate aus Rohbraunkohle hergestellt werden, besitzen sie nach der Agglomeration eine nur eingeschränkte Festigkeit. Durch schonende Trocknung in einem Band- oder Röhrentrockner wird die Festigkeit jedoch deutlich erhöht [5]. Nach einer Klassierung steht das gewünschte Granulat für den Einsatz im Extraktor zur Verfügung; exemplarische Korngrößenverteilungen der auf unterschiedlichen Wegen hergestellten Braunkohlengranulate sind in Abb. 5 dargestellt. Abb. 5 zeigt den Siebdurchgang D in Abhängigkeit vom Korndurchmesser d für ein Granulat aus in der LSWM zerkleinerter Rohbraunkohle und aus Rohbraunkohle, die im Intensivmischer zerkleinert und granuliert wurde. Zur Zerkleinerung im Intensivmischer wird die Wirblerumfangsgeschwindigkeit $u_{z,w}$ für die Dauer t_z maßgeblich erhöht. Die Granulierparameter wie die Granulierdauer t_{Gr} und die Zugabedauer des Agglomerationshilfsmittels t_D wurden dabei konstant gehalten.

Zum Vergleich ist auch die Körnung einer traditionell zerkleinerten Braunkohle dargestellt. Es zeigt sich, dass beide Granulate eine hohe Ausbeute in der angestrebten Körnung aufweisen, im Gegensatz zum traditionellen Zerkleinerungsprodukt. Der Anteil in der Fraktion $d < 0,5 \text{ mm}$ konnte durch die Granulierung auf faktisch Null reduziert werden. Das Granulat aus in der LSWM zerkleinerter Rohkohle zeigt bei gleichen Granulierparametern ein deutlich engeres Körnungsband. Dies liegt in einer wesentlich gleichförmigeren Verteilung und Feinheit des Mischerlaufguts begründet. Die Ausbeuten im angestrebten Körnungsbereich ($\Delta d = 3,15/0,5 \text{ mm}$) belaufen sich auf 97,6 % für das Granulat aus in der LSWM zerkleinerter Rohkohle

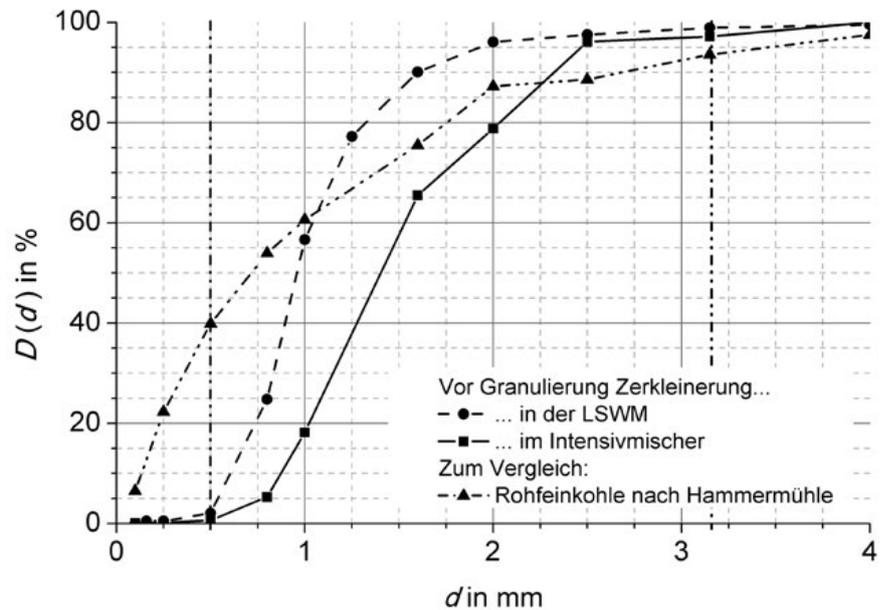


Abb. 5: Korngrößenverteilung der Granulate ($w \approx 18\%$): Granulat aus Rohkohle, zerkleinert in LSWM bzw. im Intensivmischer bei $t_z = 150 \text{ s}$, $u_{z,w} = 37 \text{ m s}^{-1}$; Granulierung im Intensivmischer $t_{Gr}/t_D = 180/120 \text{ s}$, $a_D = 3\%$, $u_{Gr,w} = 11 \text{ m s}^{-1}$

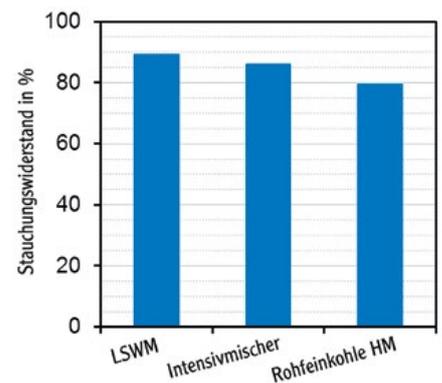
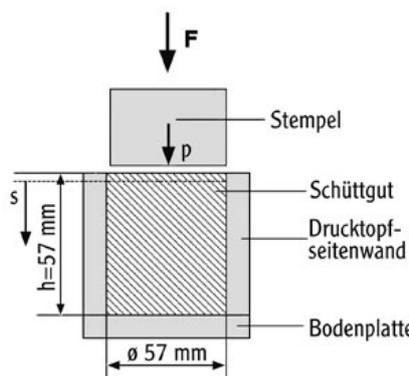


Abb. 6: Prüfapparat zur Bestimmung des Stauchungswiderstands [6] (links); Stauchungswiderstand der Granulate ($w \approx 18\%$) aus zerkleinerter Rohkohle in der LSWM und im Intensivmischer sowie der Rohfeinkohle nach traditioneller Zerkleinerung (rechts)

bzw. 96,8% bei Zerkleinerung und Granulierung im Intensivmischer.

Die Prüfung der Festigkeit fußt auf der Ermittlung des Stauchungswiderstands der Granulatschüttung. Dazu wird ein Zylinder ($d = h = 57 \text{ mm}$) vollständig mit Granulat gefüllt (siehe Abb. 6) und auf einer Universalprüfmachine mit einem Druck von 1 MPa belastet. Die Stauchung der Granulatschüttung wird als prozentuales Maß aus der Schütthöhenänderung s für die Beanspruchung ermittelt [6]; die Differenz zu 100 % ergibt den Stauchungswiderstand. Beim Vergleich dieser Granulate in Abb. 6 zeigt sich ein zufriedenstellender Stauchungswiderstand für die Granulatproben (89,2 % und 85,9 %), während der Stauchungswiderstand der Rohfeinkohle auf niedrigerem Niveau liegt (79,4 %).

Wird die Herstellung feinerer Granulate gefordert, gelingt dies durch eine entsprechende Feinerzkleinerung und Anpassung der Granulierparameter im Intensivmischer. Abb. 7 zeigt Granulate aus feinerzkleinerter Rohkohle. Die Feinerzkleinerung wurde durch Schlag- und Prallbeanspruchung in einer Labor-Universalfeinprallmühle bzw. direkt im Intensivmischer realisiert. Im angestrebten Körnungsbereich $\Delta d = 1/0,25 \text{ mm}$ kann eine Ausbeute von 76 % für Granulat aus in der Feinprallmühle zerkleinerter Rohfeinkohle erreicht werden.

Bei der Zerkleinerung und Granulierung im Intensivmischer wird eine Ausbeute im genannten Körnungsbereich von 80 % erzielt. Einen beispielhaften optischen Eindruck von den Granulaten vermittelt Abb. 8.

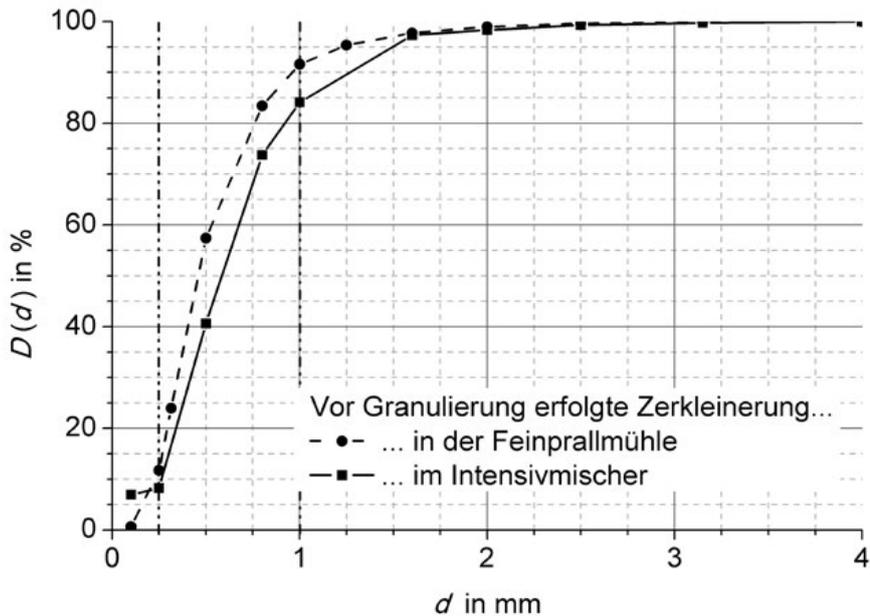


Abb. 7: Korngrößenverteilung der Granulate: Granulat aus Rohkohle, zerkleinert in einer Feinprallmühle und granuliert im Intensivmischer bei $t_{Gr}/t_D = 180/120$ s, $\alpha_D = 2,6\%$, $u_{Gr,W} = 11$ m s⁻¹ bzw. Zerkleinerung und Granulierung im Intensivmischer bei $t_Z = t_{Gr} = 150$ s, $u_{z,W} = 37$ m s⁻¹, $\alpha_D = 0\%$



Abb. 8: Granulat aus Rohfeinkohle, zerkleinert und granuliert im Intensivmischer, $t_Z = t_{Gr} = 150$ s, $u_{z,W} = 37$ m s⁻¹, $\alpha_D = 0\%$

Dabei ist die gewünschte nahezu regelmäßige Granulatform und -größe zu erkennen, die für die Extraktion wie auch für die sich anschließenden Veredlungsschritte günstig ist.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass durch die individuelle Anpassung der Granulierparameter und die entsprechende, vorangestellte Zerkleinerung der Rohbraunkohle ein maßgeschneidertes Granulat zum Einsatz in den unterschiedlichen Extraktionsverfahren bereitgestellt werden kann.

Verfahrenslösungen in der Extraktion Allgemeines zu den Forschungsansätzen

Mit der neu entwickelten Kohleaufbereitung durch Agglomeration von Kohlepartikeln zu Granulaten können z.B. eine rohstoffliche Vergleichmäßigung, verbesserte Schüttguteigenschaften und ein vorteilhaftes, enges Körnungsband erreicht werden. Dieses enge Körnungs-

band führt bei gleichzeitiger Kornfestigkeitssteigerung zu verbesserten Durchströmungseigenschaften in der aktuell eingesetzten Perkolationsextraktion, um Schüttungsverschlüsse für das Lösungsmittel bei schlechten Rohstoffqualitäten zu vermeiden.

Im Hinblick auf die Immersionsextraktion, die sich aufgrund des intensiven Stoffkontakts durch kurze Verweilzeiten und hohe Ausbeuten auszeichnet, kann die Anwendbarkeit dieses Verfahrens nur durch den Einsatz des neuen Granulats erreicht werden. Durch die Agglomeration widersteht das stabile Granulat Korn der hohen Scher- und Prallbeanspruchung des Rührers, und im Anschluss kann die Abtrennung von Feststoff und beladenem Lösungsmittel durchgeführt werden. Bei direktem Einsatz von Trockenkohle würde es zu einer kaum trennbaren „Kohle-Verschlamung“ des Lösungsmittels kommen.

Die Versuche zur Hochdruckextraktion werden im Rahmen des Forschungsvorhabens als Grundlagenforschung verstanden. Um neue Montanwachstprodukte mit spezifischen, charakteristischen Eigenschaften für weitere Einsatzfelder zu generieren, ist die Hochdruckextraktion besonders geeignet, da die Lösungseigenschaften des verdichteten Lösungsmittels CO₂ im überkritischen Bereich über die Betriebsparameter (Druck und Temperatur) den gewünschten Extraktionsprodukten gezielt angepasst werden können. Erste Untersuchungen bestäti-



Abb. 9: Beispiel eines Feststoffs aus der Hochdruckextraktion (oben) und aus der konventionellen Perkolationsextraktion von der Firma ROMONTA GmbH (unten)

gen die Überlegungen bezüglich der Realisierung dieser vielversprechenden Möglichkeiten der Hochdruckextraktion zur Beeinflussung der Wachszusammensetzung (siehe Abb. 9).

Immersionsextraktion

Die Effektivität der Fest-Flüssig-Extraktion hängt bekanntermaßen von zahlreichen Einflussgrößen ab: zu nennen sind dabei die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Feststoffs (beispielsweise speziell Oberfläche, Porosität, Korngrößenverteilung), das Lösungsmittel und das Betriebsregime (beispielsweise Temperatur, Rührerart und -geschwindigkeit). Für die Immersionsextraktion von Braunkohle wurden speziell Effekte der Feststoffaufbereitung und der sich anschließenden Feststofftrocknung, des Lösungsmittels, der Extraktionstemperatur, des Lösungsmittel-Feststoff-Verhältnisses und der Geometrie, der Ausrichtung und der Bewegungsintensität des Rührorgans untersucht. Zum Problempunkt Lösungsmittel wurde ein umfassendes Screening mit dem Ziel durchgeführt, ein ökologisch und ökonomisch optimales Lösungsmittel mit der Fähigkeit zu hochselektiver Stofftrennung zu finden. In die Versuchsauswertungen wurden neben den Extraktgehalten bzw. den Montanwachsausbeuten auch die Qualität der Substanzen sowie die Veränderung der Feststoffeigenschaften durch die Extraktion einbezogen.

Nach den grundlegenden Untersuchungen zum Extraktionsverhalten in der Immersion wird im Hinblick auf eine großtechnische Umsetzung die Maßstabsübertragung mit einem Faktor von 125 betrachtet und am Beispiel der Granulatrextraktion mit Toluol bei 80 °C näher vorgestellt. Die einzelnen Extraktionsapparate für das Scale-up von der analytischen Extraktion über einen Labor-Rührreaktor bis hin zum halbtechnischen Maßstab sind überblicksmäßig in Abb. 10 einschließlich ausgewählter Kennwerte und Untersuchungsgegenstände dargestellt. Im angeführten Beispiel wurde der eventuelle rohstoffliche Einfluss der Braunkohle durch Verwendung eines nach einer Aufbereitung gewonnenen Granulats ausgeschlossen.

Für die analytische Charakterisierung von Braunkohlen hinsichtlich ihres maximal extrahierbaren Rohmontanwachsgehalts wurde durch Graefe ein Laborverfahren [7] etabliert. Bei diesem wird eine Kleinmenge Trockenkohle erschöpfend extrahiert, um den maximalen Gehalt an Toluollöslichem zu bestimmen. Der in der Fest-Flüssig-Extraktion tatsächlich gewinnbare Extraktanteil wird jedoch geringer ausfallen, da die Graefe-Analyse bei nahezu Siedetemperatur (110,6 °C) mit großem Lösungsmittelüberschuss durchgeführt wird, aber die Extraktion in den Rührkesseln nur noch bei 80 °C stattfindet – etwas unterhalb der Temperatur des azeotropen Punktes des Gemischs Toluol-Wasser.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die bekannte Apparatur für die Ausführung der Methode nach Graefe durch Einbau eines Probenahmestutzens (siehe Abb. 10, links) erweitert, um neben dem Rohmontanwachsgehalt auch den dazugehörigen Extraktions-Zeit-Verlauf bestimmen zu können. Über ihn werden zu ausgewählten Zeitpunkten geringe Mengen Extrakt entnommen und der extrahierte Wachsgehalt der Braunkohle über die Massenbilanz ermittelt. Der Kurvenverlauf der Graefe-Extraktion für das Beispielgranulat und seine halbempirische Modellanpassung sind der Abb. 11 zu entnehmen. Während der ersten Minuten der Extraktion vollzieht sich ein intensiver Stoffübergang, der sich bereits nach einer Versuchsdauer von 30 min stark abschwächt. Die vollständige Auslaugung der Braunkohle mit Toluol innerhalb der angesetzten Versuchsdauer von 180 min wurde bestätigt. Die erhaltenen Ergebnisse geben Informati-

Analytische Extraktion	Labor-Extraktion	Halbtechnische Extraktion
<ul style="list-style-type: none"> • 100 ml Lösungsmittel • bis zu 20 g Feststoff • regeneriertes Lösungsmittel • Siedetemperatur • Filterkartusche <p><i>Lösungsmittelscreening, Rohstoffeinfluss, Körnung</i></p> <p>⇒ Extraktionskinetik ⇒ max. Rohmontanwachsgehalt</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 1l-Reaktor • bis zu 200 g Feststoff • 1-stufig • Temperatur 80 °C • Trennung im Siebbeutel <p><i>Lösungsmittelscreening, Körnung, Rührerart/-geschwindigkeit, Rohstoffeinfluss, Temperatur</i></p> <p>⇒ Extraktionskinetik ⇒ Ausbeute</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 50l-Reaktor • bis zu 8 kg Feststoff • 1-stufig • Temperatur 80 °C • Trennung im Siebbeutel <p><i>Ausgewählte Scale-up-Versuche</i></p> <p>⇒ Extraktionskinetik ⇒ Ausbeute</p> 

Abb. 10: Eigenschaften der in der Maßstabsübertragung der Immersionsextraktion eingesetzten Apparate

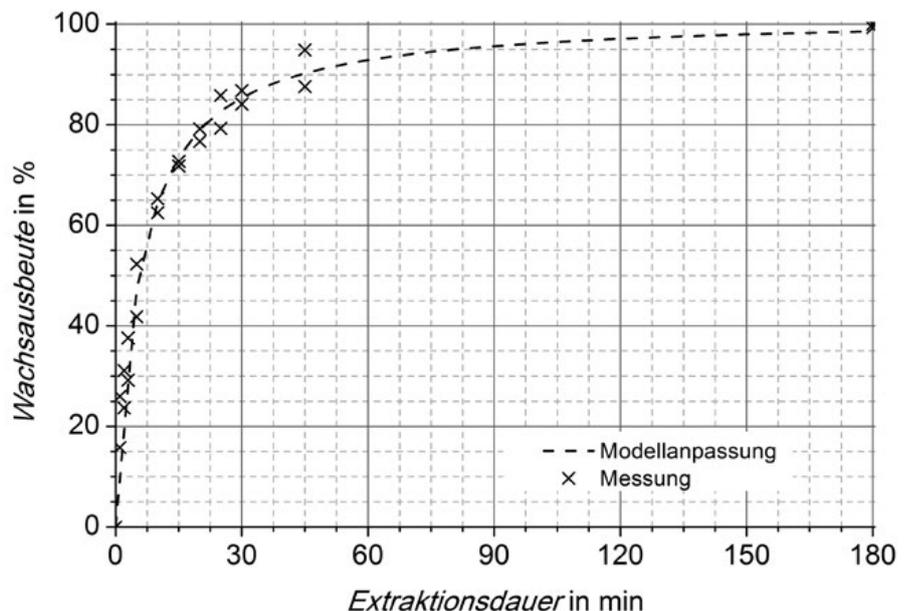


Abb. 11: Extraktionsverlauf des normierten Wachsgehalts bzw. Wachsausbeute in Abhängigkeit von der Versuchsdauer für das Beispielgranulat in der Extraktion nach Graefe im Vergleich zum Verlauf der halbempirischen Modellanpassung

onen zu den granulometrischen und mechanischen Eigenschaften des aufbereiteten Feststoffs und Anhaltspunkte für eine etwaige weitergehende Eignung in der Fest-Flüssig-Extraktion.

Die Immersionsextraktion wurde auch

in einem temperierbaren 1l- und im nächsten Schritt in einem 50l-Rührreaktor durchgeführt. Dabei wurden zunächst mittels eines Screening-Verfahrens die günstigsten Extraktionsbedingungen für die Braunkohlegranulate

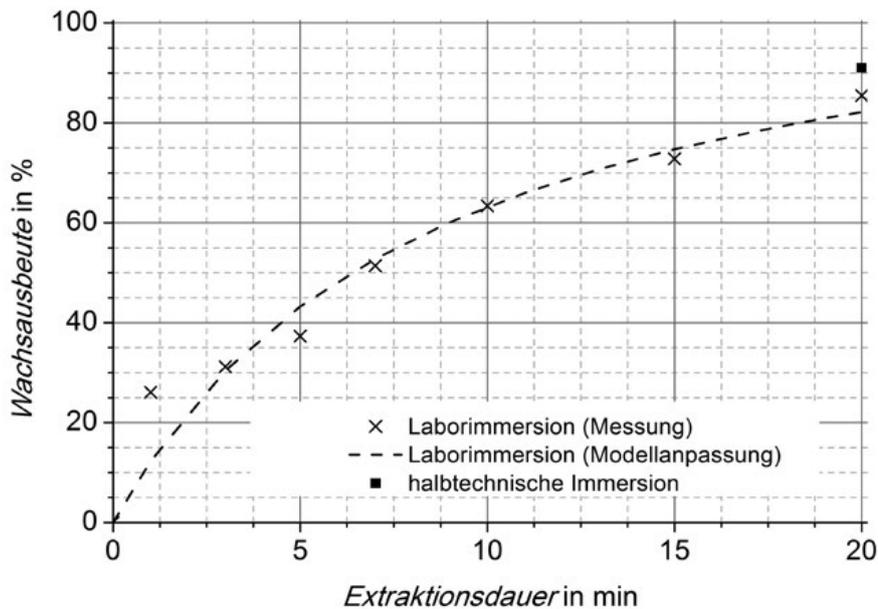


Abb. 12: Extraktionsverlauf des normierten Wachsgehaltes bzw. Wachsausbeute in Abhängigkeit von der Zeit für das Beispielgranulat im 1-l-Maßstab und halbtechnischen Maßstab mit dem Verlauf der empirischen Modellanpassung

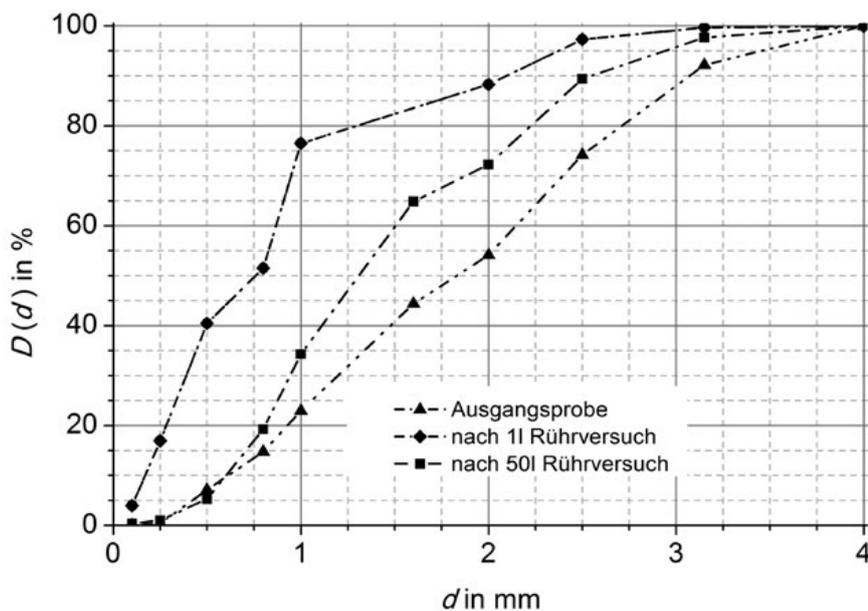


Abb. 13: Vergleich der Korngrößenverteilung der beiden in der Immersion beanspruchten Granulate mit der im Einsatzgranulat

bestimmt. Auch hier wurden nach ausgewählten Zeitintervallen Proben entnommen, um die Kinetik der Immersionsextraktion zu ermitteln. Die Abb. 12 zeigt einen typischen Extraktions-Zeit-Verlauf für die Toluolextraktion bei 80 °C.

Anfangs ist auch ein starker Anstieg des extrahierbaren Wachsgehaltes der Braunkohle – analog zur Analysenextraktion – für die ersten 20 Minuten sichtbar. Aufgrund der reduzierten Extraktionstemperatur von 80 °C löst sich aber praktisch kein weiteres Montanwachs mehr. Deshalb wurde die

Versuchsdauer entsprechend eingeschränkt. Gegenüber der Graefe-Extraktion konnte sowohl für den 1 l als auch für den 50-l-Maßstab eine hohe Ausbeute von ca. 90 % unter Einhaltung der zulässigen Wachspezifikationen erreicht werden. Die Extraktionsgeschwindigkeiten sind für beide unterschiedlichen Maßstäbe bei identischem Lösungsmittel-Feststoff-Verhältnis (1:3,5) nahezu gleich und vergleichbar mit denen bei der Graefe-Extraktion.

Im Vergleich zum Verfahren mit dem Bandextraktor findet der Extraktions-

vorgang bei um den Faktor 5 erhöhter Ausbeute signifikant schneller statt. Das bedeutet einen effizienteren Einsatz von Energie und Lösungsmittel.

Die mechanische Beanspruchung des Materials wurde anhand des Vergleichs spezifischer Stoffkennwerte vor und nach der Extraktion veranschaulicht, hier beispielsweise die Partikelgrößenverteilung als ein Indikator für den Kornzerfall durch Rührbeanspruchung, Abb. 13. Weitere Kenngrößen waren die bereits o.g. Granulatstauchung und die Druckfestigkeit.

Aufgrund der mechanischen Beanspruchung wird das Granulat in Teilen feiner. Die problematische Körnung bis 0,1 mm bleibt hiervon unberührt. Die Agglomerate zerfallen bei der halbtechnischen Immersionsextraktion in Bruchstücke größer 0,5 mm, was eine leichte Abtrennung gestattet. Jedoch nähern sich beide Körnungen der extrahierten Proben für Partikelgrößen von größer 2 mm wieder an. Durch die intensive chemische und mechanische Beanspruchung bei der Immersionsextraktion werden instabile Agglomerate zum Teil zerkleinert. Als positiv ist hier die Bildung von relativ großen Bruchstücken zu sehen, anders als beim Einsatz von Trockenkohlekörnern.

Die Übertragung der Ergebnisse vom Labor- bis hin zum halbtechnischen Maßstab ist unter Wahrung des Geschwindigkeitsvorteils problemlos möglich. Dank der neuen Aufbereitungswege können die Verfahrensvorteile der Immersion ausgenutzt werden, da das Granulat gegenüber der klassisch aufbereiteten Kohle trotz der vorherrschenden intensiven Feststoffbeanspruchung beim Rühren überwiegend stabil bleibt. Außerdem findet ein nur geringer Agglomeraterfall vor allem im unkritischen Körnungsbereich von größer 0,5 mm statt. Einem weiteren Scale-up in einen technischen Maßstab von mehr als 1000-l-Reaktorvolumen ist damit der Weg bereitet.

Zusammenfassung und Ausblick

In den beiden Teilprojekten „Aufbereitung“ und „Extraktion“ in „ibi“ wird im Rahmen der vollständig abgebildeten Prozesskette ein wichtiger Schritt zur stofflichen Nutzung von Braunkohle aufgezeigt. Um die zukünftigen rohstofflichen und prozesstechnischen Probleme bei der Verfahrensoptimierung zu meistern, werden mit der Perkolation, der

Hochdruckextraktion und der Immersion drei Verfahren getestet. Grundlagenuntersuchungen zur Hochdruckextraktion zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich einer gezielten Beeinflussung der Extrakt- bzw. der Wachszusammensetzung. Die vorlaufende Aufbereitung der Kohle, die durch die verbesserten physikalisch-mechanischen Stoffeigenschaften zur Problemlösung beiträgt, wurde per Braunkohlengranulierung umgesetzt und systematisch untersucht. Entsprechend den Randbedingungen, die durch die drei unterschiedlichen Extraktionsverfahren vorgegeben sind, können für bestimmte Körnungsbänder sehr hohe Ausbeuten (über 90 %) erzielt werden. Dank der Granulierung kann erstmals ein Immersionsverfahren zur Montanwachsextraktion eingesetzt werden, was durch die deutliche Absenkung der Verweilzeiten im Extraktor

bei Ausbeuteerhöhung zu einer Wirtschaftlichkeitssteigerung führt. Neben den grundlegenden Untersuchungen zu Einflussfaktoren wie Lösungsmittel, Lösungsmittel-Feststoff-Verhältnis, Temperatur, Rührerdrehzahl/-form und Körngröße konnte ein erfolgreiches Scale-up um den Faktor 125 realisiert werden. Vom analytischen Maßstab in der Graefe-Extraktion über den 1-l-Maßstab bis hin zum 50-l-Rührkessel waren die Ergebnisse in den Parametern Extraktionsgeschwindigkeit, Extraktausbeute und Granulateigenschaften übertragbar. Im nächsten Schritt wird das Scale-up im technischen Maßstab mit einem 20fach größeren Reaktorvolumen vollzogen.

Danksagung: Die vorgestellten Untersuchungen sind Teil des vom BMBF geförderten Projekts „ibi – Innovativer Braunkohlenintegration in Mitteldeutschland“ (Innovativer

Regionaler Wachstumskern/Unternehmen Region). An dieser Stelle bedanken wir uns zugleich bei unseren Projektpartnern ROMONTA GmbH und EPC Technology GmbH.

Quellen

- 1 Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition – Electronic Release, Wiley-VCH, 2002.
- 2 Schubert, D.; Naundorf, W.; Wollenberg, R.; Schüttgut 2003, 9 (4).
- 3 Schubert, H. (Hg.): Mechanische Verfahrenstechnik. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- 4 Knight, P. C. et al.; Powder Technology 2000, 110 (3).
- 5 Naundorf, W.; Wollenberg, R.; Schubert D.; World of Mining – Surface and Underground 2006, 58 (1).
- 6 Lehmann, B.; Schröder, H.-W.; Wollenberg, R.; Repke, J.-U.; Biomass and Bioenergy 2012, 44.
- 7 Graefe, E.; Hellthaler, Th. (Hg.): Laboratoriumsbuch für die Braunkohlenteer-Industrie – Braunkohlengruben, Braunkohlenteer-Schweleereien und -Destillationen, Paraffin- und Kerzenfabriken einschließlich der Montanwachst-Industrie. Halle: VEB Wilhelm Knapp Verlag, 1958.

Reaktivextraktion mitteldeutscher Braunkohlen mit überkritischem Ethanol

Hendrik Wollmerstädt, Thomas Kuchling, Sven Kureti

Einführung

Der Rohstoffbedarf der chemischen Industrie wird weltweit derzeit vor allem durch Erdöl und Erdgas gedeckt. In der nahen Zukunft ist jedoch davon auszugehen, dass die verfügbaren Ressourcen dafür nicht mehr ausreichen werden, so dass derzeit wieder verstärkt nach Alternativen gesucht wird. Deutschland besitzt mit einem Anteil von 14 % (40,8 Gt) [1] an den weltweit vorhandenen Reserven enorme Braunkohlevorkommen, die vor allem in drei großen Regionen lagern: das mitteldeutsche Revier (um Leipzig/Halle), das Lausitzer Revier in Nordostsachsen und Südostbrandenburg und das Rheinische Revier. Die im Lande geförderte Kohle wird gegenwärtig vor allem zur Deckung des Bedarfs an elektrischer Energie verwendet, wobei ihr Anteil am Primärenergieverbrauch im Jahr 2012 bei 12,1 % lag (1645 PJ) [2]. Der Anteil ihrer stofflichen Nutzung beschränkt sich derzeit vorwiegend auf die Herstellung von Montanwachs. Dazu werden aus der Kohle die relativ niedermolekularen toluollöslichen Bestandteile extrahiert, und ein hochmolekulares Kohlenetzwerk bleibt zurück.

Da Braunkohlen ein niedrigeres H/C-Verhältnis als typische Erdöle besitzen,

ist eine Erhöhung des Wasserstoffanteils in den Kohleverflüssigungsprodukten notwendig, damit letztere innerhalb gängiger Prozesse der chemischen Industrie als Erdölsubstitut Verwendung finden können. Basierend auf den Technologien der direkten und indirekten Kohleverflüssigung existiert eine Vielzahl von Verfahren, mit denen hohe Ausbeuten an Produkten mit einem günstigen H/C-Verhältnis erreichbar sind. Bei den indirekten Verfahren werden über den Umweg der Erzeugung von Synthesegas definierte Substanzen, wie Methanol oder auch Substanzgemische, wie Fischer-Tropsch-Paraffine, hergestellt. Die direkten Verfahren umfassen die katalytische wie auch die nichtkatalytische Hydrierung von Kohle in einer Lösungsmittelsuspension. Als Wasserstoffquelle dient entweder molekularer Wasserstoff oder das Lösungsmittel selbst, das im Kreislauf geführt und extern rehydriert werden muss. Das Produktspektrum ist aufgrund des fehlenden Syntheseschritts bei der direkten Kohleverflüssigung wesentlich breiter, da sich die Produkte direkt vom komplexen Naturmaterial Kohle ableiten.

Ziel der Forschungsarbeiten an der Professur für Reaktionstechnik ist es,

mitteldeutsche Braunkohle zu großen Anteilen in niedermolekulare Produkte ($M < 500 \text{ g/mol}$) umzuwandeln, die statt Erdöl als Edukt für eine Vielzahl von Produkten der chemischen Industrie verwendet werden können. Ein möglicher Verfahrensweg ist die Reaktivextraktion der Kohle.

Als Reaktivextraktion ist in diesem Fall eine Pyrolyse der Kohle in einem potenziell reaktiven Extraktionsmittel zu verstehen. Dies bringt für das Verfahren mehrere Vorteile, die sowohl zu einer Steigerung der Ausbeute als auch der Qualität des Produkts (H/C-Verhältnis) führen können. Der stärkere Anfall an flüssigen bzw. löslichen Komponenten beruht vor allem auf der Absättigung der primär pyrolytisch aus der Kohle gebildeten Radikale durch das Extraktionsmittel (siehe Abb. 1). Zudem kann auch das Extraktionsmittel thermisch in Radikale gespalten werden, die in der Folge das makromolekulare Kohlenetzwerk in kleinere Einheiten spalten können.

Infolge der Übertragung von Wasserstoff oder wasserstoffreichen Bruchstücken des Extraktionsmittels auf die Kohle kommt es zu einer Erhöhung des H/C-Verhältnisses. Die Reaktionstemperatur liegt in Abhängigkeit von Extrak-

Abb. 1:
Reaktionswege
der Reaktivex-
traktion, EM =
Extraktionsmittel

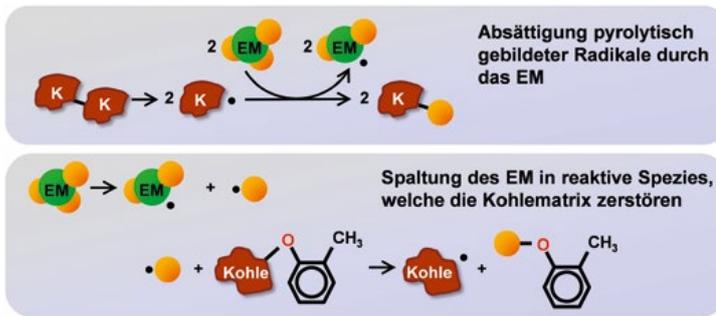


Tabelle 1: Charakterisierung der eingesetzten Braunkohle (Tagebau Schleenhain)

* waf = water ash free (Wasser-Asche-frei)

Immediatanalyse	(Ma.-% waf)*	Asche: 9,8	Flüchtige: 57,2	C _{fix} : 33,0		
Elementaranalyse	(Ma.-% waf)*	C: 73,5	H: 5,9	S _c : 4,1	N: 0,5	O: 16,0
Elementverhältnisse	–	H/C: 0,95	O/C: 0,163	S/C: 0,021		

tionsmittel bzw. Kohlezusammensetzung etwa im Bereich von 300...450 °C. Da dieses Verfahren nichtkatalytisch arbeitet, besteht kein Zwang zu einer aufwändigen Abtrennung eines Katalysators. Bei Verwendung eines kostengünstigen Extraktionsmittels muss dieses nach dem Einsatz nicht rehydriert, sondern vor der wiederholten Verwendung lediglich destillativ aufgereinigt werden. Umgesetztes Extraktionsmittel muss ersetzt werden.

Der Einsatz von Extraktionsmitteln im überkritischen Zustand unter hohen Drücken und Temperaturen bietet mehrere Vorteile gegenüber der herkömmlichen Extraktion mit Flüssigkeiten. Unter diesen Bedingungen kann zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand nicht mehr unterschieden werden. Überkritische Fluide kombinieren positive Eigenschaften beider Aggregatzustände, wie

- hoher Diffusionskoeffizient und niedrige Viskosität des Gases, die einen effektiven Stofftransport insbesondere innerhalb der Poren der Kohle bewirken sowie
- hohe Dichte der Flüssigkeit und folglich hohe Konzentration des Extraktionsmittels.

Darüber hinaus haben die meisten überkritischen Fluide, wie z. B. Wasser oder CO₂, ein hohes Lösungsvermögen für organische Substanzen. Alle genannten Eigenschaften fördern insbesondere Reaktionen an der Phasengrenzfläche fest/flüssig und können zu hohen Extraktausbeuten führen.

Da die Reaktivextraktion für mitteldeutsche Braunkohlen nach Kenntnis der Autoren bisher nicht umfangreich untersucht wurde, stand am Beginn der Forschungsarbeiten ein Extraktionsmit-

tel-Screening, um die Reaktivität verschiedener in Frage kommender Substanzen einschätzen zu können. Für das am besten geeignete Extraktionsmittel – Ethanol – wurden weitere Versuche durchgeführt, um die Abhängigkeit der Extraktausbeuten von Parametern, wie Reaktionstemperatur und -druck, Verweilzeit, Kohleart, -feuchte und -körnung sowie Massenverhältnis Kohle/Extraktionsmittel zu ermitteln und Arbeitshypothesen zu möglichen Reaktionsmechanismen erarbeiten zu können.

Experimentalteil

Als Ausgangsstoff wurde eine mitteldeutsche Braunkohle aus dem Tagebau Schleenhain (ca. 25 km südlich von Leipzig) verwendet. Die Ergebnisse der Immediat- und Elementaranalysen sind in *Tabelle 1* dargestellt. Sie entsprechen einer typischen, eozänen Braunkohle mit hohem Schwefelgehalt. Die Kohle wurde gemahlen und in verschiedene Kornfraktionen klassiert, die getrocknet bzw. grubenfeucht verwendet wurden.

Für alle Versuche kam ein Hochdruck-Rührautoklav der Firma Parr zum Einsatz (Volumen: 500 ml, max. 500 °C/310 bar). Die Kohle wurde mit der entsprechenden Menge an Extraktionsmittel in den Reaktor gegeben und dieser anschließend mit Stickstoff inertisiert, um Oxidationsreaktionen durch Luftsauerstoff zu verhindern. Der Reaktor wurde mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/min auf Reaktionstemperatur gebracht und anschließend für alle Versuche für eine Dauer von 0,25...2 h isotherm gehalten. Das Produktgas wurde in einem Gassammelbehälter aufgefangen und volumetrisch bestimmt. Ferner wurden Gasproben entnommen und mittels Micro-GC auf ihre Zusammensetzung analysiert (H₂, O₂, N₂, CO, CO₂, H₂S, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈, i-C₄H₁₀, n-C₄H₁₀). Die Reaktionsmischung besteht nach dem Versuch aus dem Extraktionsmittel mit darin gelösten kohlestämmigen Substanzen und einem festen Rückstand, an dem niedermolekulare, im Extraktionsmittel unlösliche Komponenten anhaften können. *Abb. 2* zeigt schematisch die weitere Produktaufbereitung. Der Rückstand wurde einer dreistufigen Soxhlet-Extraktion mit den Lösungsmitteln n-Heptan, Toluol und Tetrahydrofuran (THF) unterzogen. Auf diese Weise wurden die folgenden Produktfraktionen gewonnen:

- heptanlösliches Produkt (Aliphaten und Wachse, wasserstoffreich, sauerstoffarm),
- toluollösliches Produkt (Polyaromaten, Asphaltene, relativ heteroatomarm) und
- THF-lösliches Produkt (hochmolekulare Polyaromaten, Preasphaltene, heteroatomreich).

Es wurden zwei potenzielle Wertstoff-

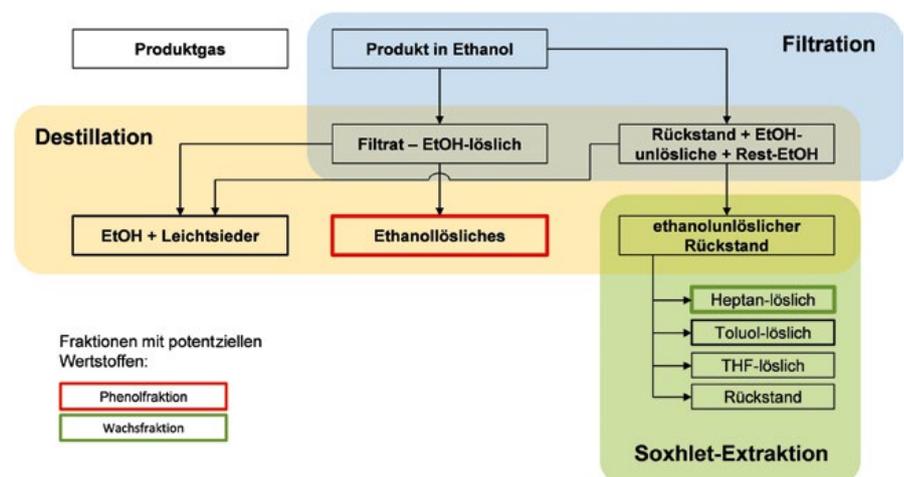


Abb. 2: Schema der Produktaufbereitung

Abb. 3: Produktausbeuten bei der Reaktivextraktion von grubenfeuchter (links) und getrockneter Braunkohle (rechts) mit Ethanol

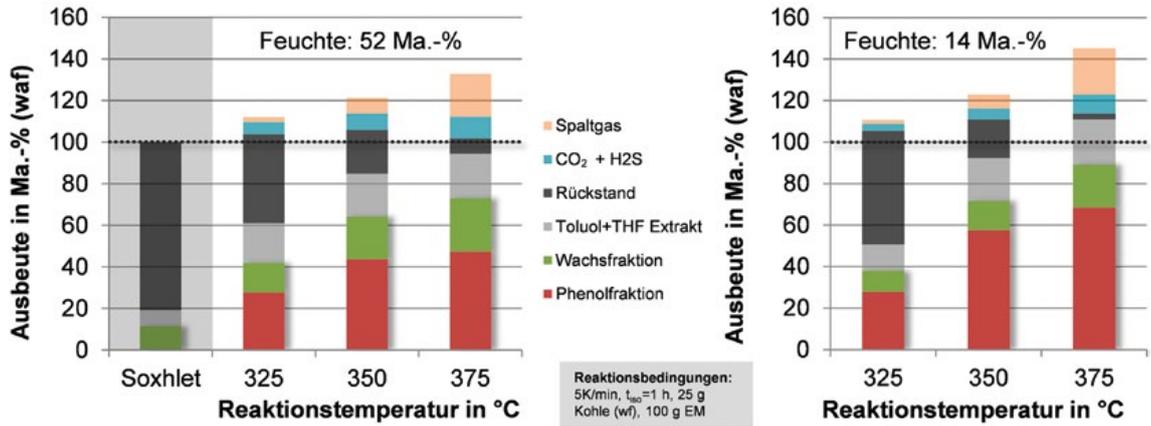
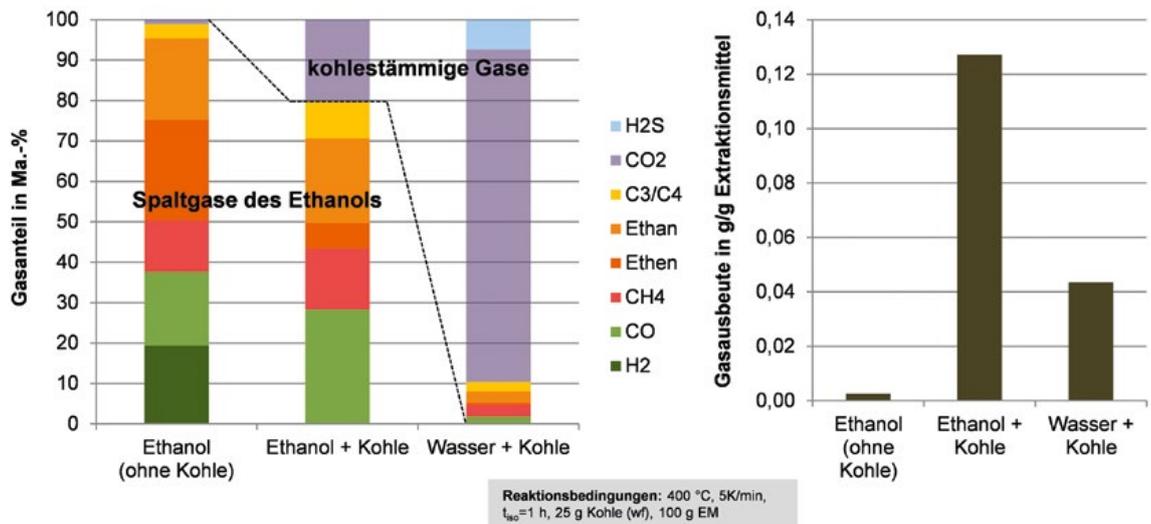


Abb. 4: Vergleich von Gasausbeuten bei Verwendung von Wasser und Ethanol als Extraktionsmittel



fraktionen festgelegt, die einen hohen Anteil niedermolekularer Komponenten mit einem hohen H/C-Verhältnis aufweisen: die Phenolfraktion, die vor allem heteroatomreiche phenolische Komponenten enthält, und die Wachsfraktion mit einem hohen Anteil heteroatomarmer aliphatischer Bestandteile. Bei der Phenolfraktion handelt es sich um eine braunschwarze, klebrige, hochviskose Flüssigkeit ohne definierten Erstarrungspunkt, die Wachsfraktion – ebenfalls braunschwarz – besitzt einen Erweichungsbereich von 70... 80 °C.

Die Produktausbeuten sind immer auf die wasser- und aschefreie organische Kohlesubstanz bezogen (waf). Für eine genauere Charakterisierung wurden die Extraktfraktionen mittels GCMS, GPC (Gelpermeationschromatografie), ATR-FTIR-Spektrometer und Elementaranalyse analysiert.

Ergebnisse und Diskussion
Einfluss von Temperatur und Kohlefeuchte

Der Parameter mit dem größten Einfluss auf die Produktausbeuten ist, wie bei vielen Kohle-Konversionsprozessen,

die Temperatur. Im Vergleich mit der klassischen Extraktion der Rohkohle kann die Gesamtextraktausbeute von 19 Ma.-% (waf) auf über 90 Ma.-% (waf) bei einer Reaktionstemperatur von 375 °C gesteigert werden (siehe Abb. 3). Unter optimalen Bedingungen sind sogar Gesamtextraktausbeuten > 100 Ma.-% (waf), bezogen auf die eingesetzte organische Kohlemasse möglich, was auf den Einbau von Ethanolbruchstücken in kohlestämmige Produkte zurückzuführen ist. In diesem Fall sinkt die Menge des nicht extrahierbaren Rückstands mit steigender Temperatur auf unter 10 Ma.-% (waf) ab. Das bedeutet, dass die organische Kohlesubstanz durch chemische Umsetzung mit Ethanol nahezu vollständig in lösliche Bestandteile überführt werden kann.

Im Vergleich zwischen getrockneter und grubenfeuchter Kohle zeigt sich, dass vor allem bei Temperaturen oberhalb von 350 °C mit der auf einen Wassergehalt von 14 Ma.-% getrockneten Kohle höhere Umsätze und Extraktausbeuten erzielt werden können (siehe Abb. 3). Die Ausbeuten an potenziellen

Wertstoffen (Phenol- und Wachsfraktion) steigen von 12 Ma.-% (waf) für die Soxhletextraktion mit Toluol (in Anlehnung an die klassische Montanwachs-gewinnung) auf über 73 Ma.-% (waf) bei 375 °C und feuchter Kohle bzw. fast 89 Ma.-% (waf) für trockene Kohle.

Bei der Reaktivextraktion fällt auch ein Produktgas an, dessen Anteil exponentiell mit steigender Temperatur von 8 Ma.-% auf bis zu etwa 30 Ma.-% (waf) bei 375 °C zunimmt. Seine Hauptbestandteile sind Kohlenmonoxid, -dioxid, Methan, Ethen und Ethan. Um den Anteil des Gases, der der thermischen Spaltung des Extraktionsmittels entstammt, einschätzen zu können, wurden Vergleichsversuche mit reinem Ethanol mit und ohne Kohle bei 400 °C durchgeführt (siehe Abb. 4). Wird Ethanol alleine den Reaktionsbedingungen ausgesetzt, ist die Gasbildung mit 0,003 g/g Ethanol vernachlässigbar klein; es kommt praktisch zu keiner Reaktion. Dagegen steigt in Gegenwart von Kohle die Gasausbeute auf 0,13 g/g Ethanol. Offensichtlich wird die thermische Zersetzung von Ethanol erst durch die Anwesenheit von Kohle

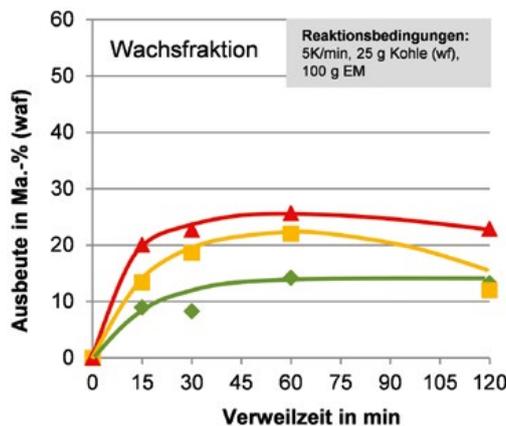


Abb. 5: Abhängigkeit der Ausbeuten der Wachs- und der Phenolfraction von der Verweilzeit

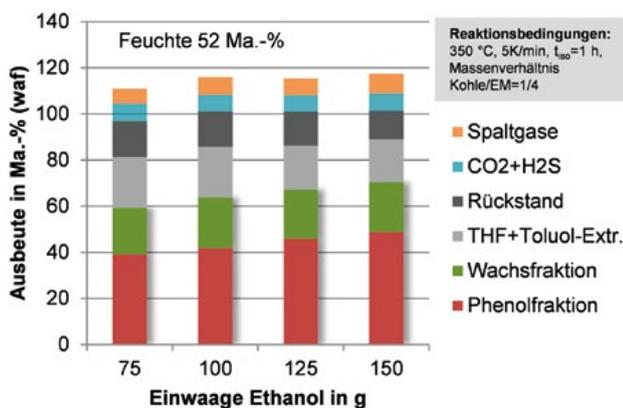
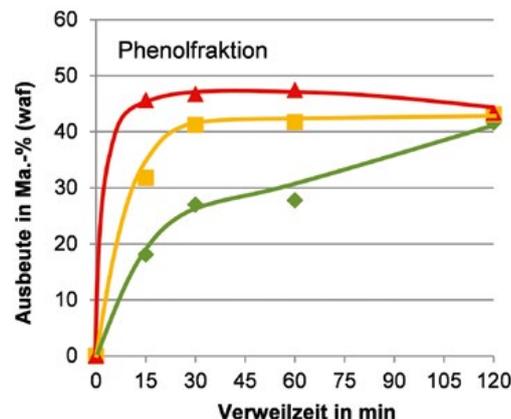
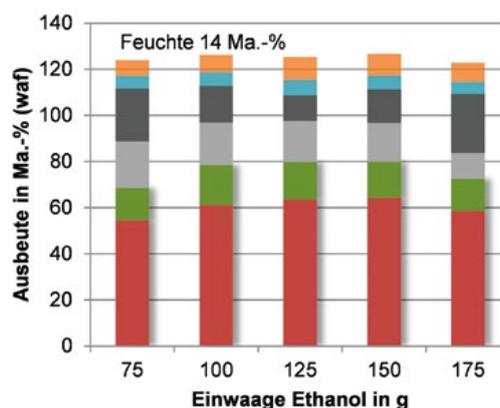


Abb. 6: Produktverteilung in Abhängigkeit von der Ethanoleinwaage für trockene und grubenfeuchte Braunkohle



initiiert. Bei Einsatz von Wasser an Stelle des Ethanols werden nur etwa 0,04 g Gas pro g Wasser (überwiegend CO_2 und H_2S) gebildet. Auf Grundlage dieser Beobachtungen können beim Produktgas Spaltgase des Ethanols (CO , CH_4 , C_2H_6 und C_2H_4) und kohlestämmige Gase (CO_2 und H_2S) unterschieden werden. Auf dieser Basis lässt sich der Ethanolverbrauch bei den Versuchen näherungsweise quantifizieren.

Einfluss der Verweilzeit (isotherme Phase)

Wie bei vielen reaktionstechnischen Fragestellungen ist auch hier die Verweilzeit der Reaktionsmischung bei Reaktionstemperatur ein technisch wichtiger Parameter. Diese wurde im Bereich von 0,25 ... 2 h variiert, *Abb. 5*.

Zu erkennen ist, dass der Anstieg für die Wachsfraction im Zeitraum von 0 ... 60 min wesentlich kleiner ausfällt als für die Phenolfraction. Für die Wachsfraction resultiert eine optimale Ausbeute bei einer Verweilzeit von 60 min. Die Ausbeute der Phenolfraction steigt schneller an und ändert sich mit zunehmender Verweilzeit bei Reaktionstemperaturen ab 350 °C kaum noch. Bei 325 °C steigen die Ausbeuten nach 30 min weiter an, sodass sie bei einer Verweilzeit von 2 h im Falle der Phenol-

fraction für alle eingestellten Temperaturen mit etwas mehr als 40 Ma.-% (waf) gleich sind.

Einfluss des Extraktionsmittel-Partialdrucks

Der Partialdruck des Extraktionsmittels (EM), der über die Gesamteinwaage bei gleichbleibendem EM/Kohle-Verhältnis variiert wurde, hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Extraktausbeuten und auf die Rückstandsmengen. Dabei verhalten sich grubenfeuchte und getrocknete Kohle unterschiedlich. Bei Einsatz von grubenfeuchter Kohle steigt die Ausbeute der Wertstofffraktionen von 59 Ma.-% (waf) bei 75 g Ethanol auf 70 Ma.-% (waf) bei 150 g Ethanol. Hierbei sinken die Anteile der toluol- und THF-löslichen Fraktion sowie des Rückstands. Grund für dieses Verhalten sind die höhere Dichte und die damit höhere Konzentration des Extraktionsmittels, die unterstützend auf die Prozesse des Abbaus der Kohlematrix wirken.

Bei feuchter Kohle ergibt sich ein Optimum an Wertstoffausbeute für Ethanoleinwaagen zwischen 100 ... 150 g. Die Ausbeute der toluol- und THF-löslichen Fraktion sinkt kontinuierlich mit steigender Ethanoleinwaage, während die Menge des Rückstands bei 125 g Ethanol

ein Minimum erreicht und bei höheren Einwaagen wieder zunimmt. Scheinbar laufen bei höheren Ethanol-Partialdrücken unter Abwesenheit von Wasser verstärkte Prozesse der Koksbildung ab.

Weitere Einflussgrößen

Der Massenanteil an der Reaktionsmischung wurde in Grenzen von 0,1 ... 0,3 g Kohle/g Mischung mit trockener wie auch mit feuchter Kohle variiert. Aus *Abb. 7* ist zu erkennen, dass die Wertstoffausbeute bei feuchter und trockener Kohle kaum durch den Kohleanteil an der Reaktionsmischung beeinflusst wird. Allerdings verschiebt sich das Verhältnis zwischen Phenol- und Wachsfraction bei höheren Einwaagen zugunsten der Wachsfraction.

Mit einer höheren Kohlekonzentration steigt die Wahrscheinlichkeit für Kondensationsreaktionen an funktionellen Gruppen bzw. für die Rekombination der aus der Kohlematrix gebildeten Radikale, sodass bei hohen Kohleanteilen offensichtlich höhermolekulare Produkte gebildet werden. Für einen technischen Prozess ist der gefundene Zusammenhang interessant, da durch den Kohleanteil an der Reaktionsmischung die Molekülgrößenverteilung gesteuert werden könnte. Ein weiterer positiver Nebeneffekt

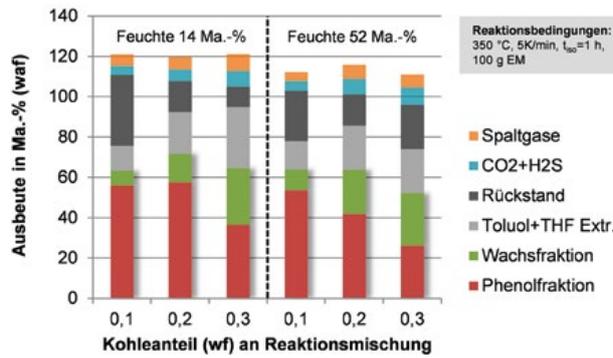


Abb. 7: Produktausbeuten in Abhängigkeit vom Kohleanteil an der Reaktionsmischung

fekt bei Einsatz geringer Kohleanteile ist die Reduktion des Spaltgasanteils.

Unter Wasserstoffatmosphäre (50 bar kalt) im Reaktor ist kein signifikanter Effekt auf die Extraktausbeuten festzustellen. Eventuell werden auftretende Reaktionen mit Wasserstoff durch die hohe Reaktivität des Ethanol überlagert.

Die Korngröße hat ebenfalls nur einen geringen Einfluss auf die Produktausbeuten, vermutlich bedingt durch das gewählte Versuchsdesign unter Nutzung eines Batch-Autoklaven mit hohen Verweilzeiten. Bei alternativer, praxisnäherer Versuchsdurchführung in einer kontinuierlichen Extraktionsapparatur könnte bei kurzen Verweilzeiten aufgrund von Stoffübergangswiderständen der Einsatz sehr grober Kohlefraktionen kontraindiziert sein.

Produktcharakterisierung

Bei den kohlestämmigen Reaktionsprodukten handelt es sich um extrem komplex zusammengesetzte Vielstoffgemische, deren qualitative und quantitative Analyse sehr anspruchsvoll ist. Zunächst kamen daher vor allem Methoden zur Bestimmung von Summenparametern (Elementaranalyse) oder qualitative Analysemethoden (IR, GPC, GC-MS) zum Einsatz. Wichtige Kenngrößen von Kohleverflüssigungsprodukten sind die

molaren H/C-, O/C- und S/C-Verhältnisse, da diese eine erste Abschätzung der Zusammensetzung hinsichtlich Aromatizität sowie des Anteils funktioneller Gruppen zulassen. Für Reaktionstemperaturen von 325 ... 375 °C und feuchte Kohle sind die Elementverhältnisse der wichtigsten Fraktionen in Abb. 8 präsentiert.

Die Phenolfraction besitzt ein H/C-Verhältnis von etwa 1,3, das mit steigender Temperatur nur geringfügig größer wird. Dagegen liegt das H/C-Verhältnis der Wachsfraktion bei 325 °C bei 1,6 und sinkt bei 375 °C mit steigender Ausbeute an dieser Fraktion auf 1,4. Die Phenolfraction enthält demnach mehr Aromaten und die Wachsfraktion mehr Aliphaten. Das nahezu temperaturunabhängige H/C-Verhältnis der Phenolfraction deutet auf deren gleichbleibende Zusammensetzung hin. Dagegen ändern sich die chemischen Eigenschaften der Wachsfraktion stärker. Bei tiefen Reaktionstemperaturen dominieren wasserstoffreiche Montanwachse und Folgeprodukte. Mit zunehmender Temperatur wächst der Anteil an wasserstoffärmeren aromatischen Bruchstücken der Kohlematrix. Selbst der Extraktionsrückstand ist mit einem H/C-Verhältnis zwischen 0,77 und 0,89 noch relativ wasserstoffreich, sodass

insgesamt eine Zunahme an Wasserstoff im Produkt im Vergleich zum Edukt zu verzeichnen ist. Diese Erhöhung ist auf die Anlagerung von Wasserstoffatomen bzw. wasserstoffreichen Bruchstücken des Ethanol zurückzuführen.

Die Wertstofffraktionen sind wesentlich sauerstoffärmer als die Ausgangskohle. Hauptgrund ist die intensive Abspaltung von CO₂ infolge von Decarboxylierungsreaktionen. Das O/C-Verhältnis der Wachs- und der Phenolfraction ist nur schwach temperaturabhängig, mit Tendenz zu geringeren Werten bei höherer Temperatur. Dabei ist das Verhältnis in der Wachsfraktion nur halb so groß wie in der Phenolfraction.

Zu erwarten wäre ein mit steigender Temperatur stark sinkendes O/C-Verhältnis, da C-O-Bindungen weniger stabil sind als die C-C-Bindungen und folglich empfindlicher in Bezug auf Decarboxylierungs-, Decarboxylierungs- und Hydrolysereaktionen im untersuchten Temperaturbereich. Diese Reaktionswege könnten durch den Einbau von sauerstoffhaltigen Bruchstücken des Ethanol überlagert werden, was zu einem konstanten O/C-Verhältnis der Produkte führt.

Die S/C-Verhältnisse der Fraktionen liegen bei 325 °C, mit Ausnahme der Phenolfraction, unter dem der Ausgangskohle. Übereinstimmend mit der Literatur [3] konnte über Elementbilanzen gezeigt werden, dass je nach Reaktionsbedingungen nur etwa 50–60 Ma.-% des mit der Edukt-Kohle eingebrachten Schwefels in den Extrakten wiederzufinden sind.

Die Reaktivextraktion mit Ethanol trägt zur partiellen Entschwefelung der Produkte bei, indem ein großer Anteil in gasförmige Schwefelverbindungen bzw. in ethanollösliche niedrigsiedende organische Sulfide, Disulfide, Thiophene und Thiole überführt wird.

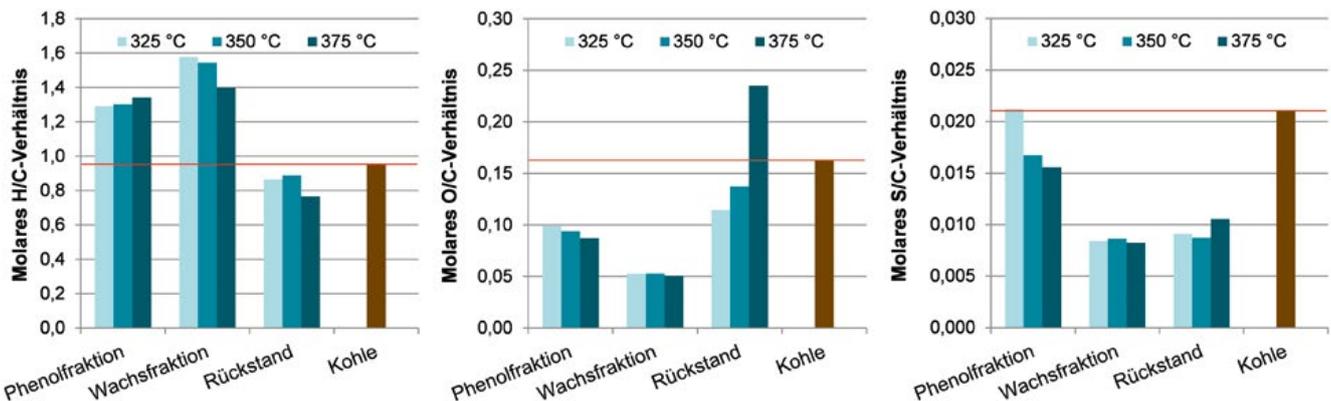


Abb. 8: Elementverhältnisse der wichtigsten Fraktionen in Abhängigkeit von der Reaktionstemperatur

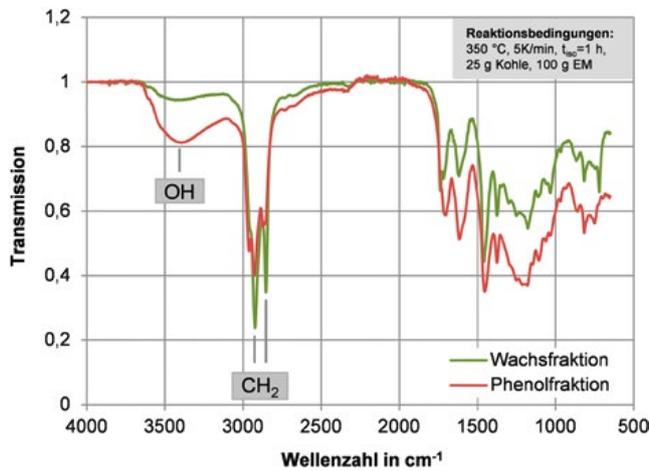
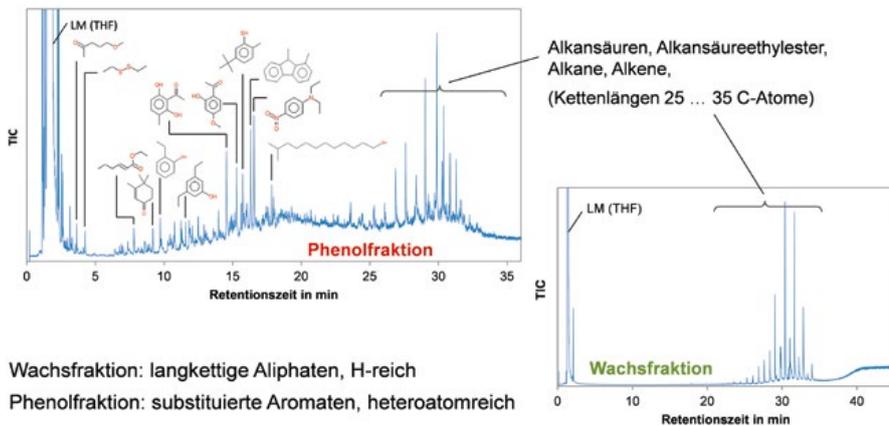


Abb. 9: IR-Spektren von Phenol- und Wachsfraktion



Wachsfraktion: langkettige Aliphaten, H-reich
Phenolfraction: substituierte Aromaten, heteroatomreich

Abb. 10: GC-MS-Chromatogramme der Phenol- und der Wachsfraktion

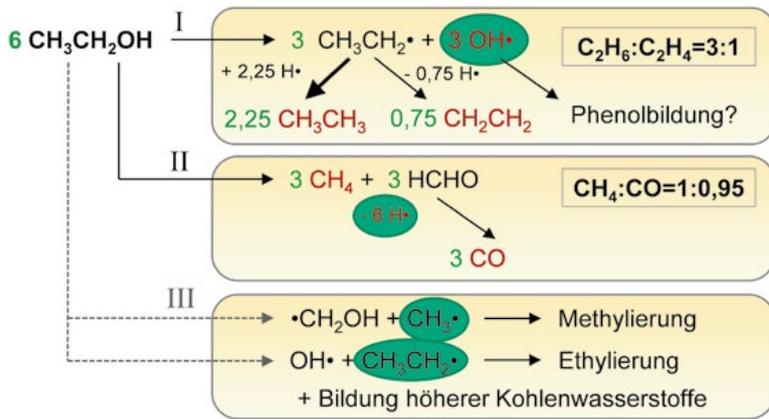


Abb. 11: Hypothetischer Reaktionsmechanismus des Ethanols

In Abb. 9 sind vergleichend die IR-Spektren der Phenol- und der Wachsfraktion eines Versuchs bei 350 °C dargestellt. Die Absorptionsbande zwischen 3.100 und 3.600 cm⁻¹ kann OH-Gruppen zugeordnet werden. Ihre Intensität ist für die sauerstoffhaltigere Phenolfraction wesentlich höher als für die Wachsfraktion mit geringerem Sauerstoffanteil. Die Banden bei 2.923 cm⁻¹ und bei 2.854 cm⁻¹ entsprechen den C-H-Schwingungen von CH₂-Gruppen der Aliphaten und sind bei der Wachsfraktion wesentlich

intensitätsstärker ausgeprägt als bei der Phenolfraction, was auf eine eher aliphatische Zusammensetzung des Waxes schließen lässt, einhergehend mit einem höheren H/C-Verhältnis.

In Abb. 10 sind die Ergebnisse der GC-MS-Analyse von der Phenol- und der Wachsfraktion (Reaktionstemperatur 350 °C) dargestellt. Die Zuordnung einzelner Peaks zu Substanzen wurde mit Hilfe einer Datenbank durchgeführt. Die Phenolfraction enthält Substanzen mit niedrigerer Molmasse gegenüber der

Wachsfraktion. Während die Komponenten der Phenolfraction stark heteroatomhaltig sind, dominieren bei denen der Wachsfraktion aliphatische Moleküle wie Alkansäureethylester, Alkanole, Alkane und Alkene im Kettenlängenbereich von 25...35 C-Atomen. Diese werden aus den etwa doppelt so langen Molekülen des Montanwaxes – Ester von Alkanolen und Alkansäuren – die bei den ablaufenden Reaktionen gespalten werden, gebildet. Daneben sind höhermolekulare – nicht GC-gängige und daher im Chromatogramm nicht sichtbare – Substanzen in der Wachsfraktion enthalten.

Hypothese zum Reaktionsmechanismus

Auf Grundlage der experimentellen Daten für grubenfeuchte Kohle sowie von Literaturrecherchen wurde eine Hypothese für die potenziellen Reaktionswege der Reaktivextraktion mit Ethanol aufgestellt (siehe Abb. 11) [4], [5].

Der Reaktionspfad I geht von einer Spaltung des Ethanols in ein Ethyl- und ein OH-Radikal aus. Die OH-Radikale können die Kohlematrix in kleinere Bruchstücke spalten und freie Valenzen absättigen, was den hohen Anteil an phenolischen Substanzen in der Phenolfraction erklären würde. Die Ethylradikale können durch Rekombination mit einem Wasserstoffradikal oder durch Abgabe eines Wasserstoffradikals zu Ethan bzw. Ethen reagieren. Beide Gase werden in großen Mengen – unabhängig von der Reaktionstemperatur – im Verhältnis 3:1 gebildet. Zudem ist eine Spaltung des Ethanols in Methan und Formaldehyd, gefolgt von einem Zerfall des Formaldehyds in CO und Wasserstoffradikale, möglich (Reaktionspfad II). Die Wasserstoffradikale können die Aufspaltung der Kohlematrix unterstützen und stehen zur Hydrierung gemäß Pfad I zur Verfügung. Das Mol-Verhältnis der gebildeten Gase CH₄ und CO von 1:1 stimmt mit dem im Versuch ermittelten Verhältnis von 1:0,95 gut überein. Reaktionsweg III führt zur Bildung von Methyl- und Hydroxymethyl- bzw. Ethylradikalen, die die Kohlematrix spalten, absättigen und somit zu einem hohen H/C-Verhältnis führen können. Die Alkylradikale können aber auch miteinander rekombinieren und höhere Alkane (Propan, Butan) bilden, die ebenfalls im Produktgas enthalten sind. Weiterhin ist eine Funktionalisierung der Produkte durch Anlagerung von Hydroxymethylradikalen

bzw. Hydroxylradikalen möglich. Diese Überlegungen zum Mechanismus geben die experimentellen Befunde für grubenfeuchte Kohle sehr gut wieder, müssen jedoch noch mit geeigneten Versuchen und Analysenverfahren überprüft werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Reaktivextraktion wurde eine Möglichkeit gefunden, mitteldeutsche Braunkohlen nahezu vollständig in lösliche Bestandteile zu überführen. Dabei werden die resultierenden Phenol- und Wachsfraktionen als für die stoffliche Verwendung geeignet eingestuft. Die Einflüsse von Kohlefeuchte, Reaktionstemperatur und Verweilzeit auf Wertstoffausbeuten und Spaltgasentstehung wurden ermittelt. Die Charakterisierung der Produkte ist sehr schwierig, da die Extrakte sehr komplex und z.T. hochmolekular und damit nur für wenige analytische Methoden zugänglich sind. Ausgehend von eigenen experimentel-

len und von Literaturdaten wurde ein Reaktionsmechanismus postuliert, der die Produktgaszusammensetzung und die Extrakteigenschaften gut zu erklären vermag. Dieser muss mit geeigneten Methoden in weiteren Versuchen validiert werden. Dies ist z. B. durch die Verwendung von isoto-penmarkiertem Ethanol (^2H , ^{13}C , ^{17}O) in Verbindung mit geeigneten Analysenverfahren, wie der NMR-Spektroskopie möglich. Weitere Möglichkeiten bietet die Untersuchung von Reaktionen zwischen Ethanol und Modells-substanzen, die einzelne, auch in Braunkohlen vorkommende funktionelle Gruppen enthalten.

Die bei der Reaktivextraktion mit Ethanol gewinnbaren Extrakte sind – wie gezeigt – sehr komplex zusammengesetzt und daher kaum direkt als Einsatzstoff in der chemischen Industrie geeignet. Daher sind weitere Aufbereitungsschritte (wie z. B. Extraktion, Destillation, Hydrierung, Hydrocracken ...)

notwendig, damit die Anforderungen an die entsprechenden Edukte erfüllt werden können.

Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Förderkennzeichen 03WKKBZ05B) gefördert.

Quellen

- 1 Kurzstudie Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2006, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2006
- 2 Zahlen und Fakten Energiedaten, 2013, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013
- 3 C. Muchmore and J. Chen: Removal of organic sulfur from coal by reaction with supercritical alcohols, ACS Symposium Series, 1986, Band 1, S. 24-34
- 4 J. Park, R. Zhu, M. Lin: Thermal Decomposition of Ethanol. 1. Ab Initio MO/RRKM Prediction of Rate Constant and Product Branching Ratios, The Journal of Chemical Physics, 2002, Band 117, Nr. 7, S. 1-16
- 5 H. Lu, X. Wie, Y. Rui, Y. Peng, L. Qie, Sequential thermal dissolution of Huoilinguole lignite in Methanol and Ethanol, Energy&Fuels, 2011, Band 25, Nr. 6, S. 2741-2745

Co-Pyrolyse von Kohlen und Biomassen

Möglichkeiten für die stoffliche Nutzung

Denise Reichel¹, Steffen Krzack², Jan Friedemann¹

Pyrolyseprozesse für die stoffliche Nutzung von Kohlenstoffträgern

Unter Pyrolyse (altgriechisch: *pyr* „Feuer“, *lysis* „(Auf)lösung“) wird die thermische Zersetzung von organischen Rohstoffen unter Luftabschluss verstanden. Als Produkte entstehen ein fester, kohlenstoffhaltiger Rückstand (Koks), ein Kondensat, bestehend aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffen (Teer/Öl) und Wasser, sowie Pyrolysegas. Die Pyrolyse (auch pyrolytische Zersetzung oder Entgasung) läuft bei anderen thermochemischen Verfahren – wie der Vergasung, der Verbrennung und der Hydrierung – als Teilprozess ab und spielt auch als Einzelverfahren zur Kokserzeugung, zur Produktion von flüssigen Kohlenwasserstoffen und bei der Brennstoffvorbehandlung (insbesondere bei biogenen Einsatzstoffen) eine wichtige Rolle. Sie ist das älteste thermochemische Ver-

edlungsverfahren für Braun- und für Steinkohle. Die Anfänge der Pyrolyse von Biomasse reichen sogar bis in die europäische Mittelsteinzeit (8300–4000 v. Chr.) zurück, in der Birkenholz mittels Pyrolyse zur Teer und Pechgewinnung genutzt wurde. Infolge der Verknappung der Holzbestände ab Mitte des 18. Jahrhunderts wurde für die Koks- und Teergewinnung zunehmend auf die Nutzung von Kohle übergegangen. Heute liefern moderne Kokereien nicht nur Koks für den Einsatz in Hochöfen zur Eisenerzverhüttung, sondern sind auch wichtigste Produzenten von insbesondere mehrkernigen aromatischen Verbindungen für die chemische Industrie [1]. Einen Überblick über die im Bereich der Biomasse und Kohlepyrolyse verfügbaren Verfahren sowie deren Produkte und Anwendungsfelder gibt *Abb. 1*.

Eigenschaften und Zersetzungsverhalten von Kohlen und Biomassen

Biomassen und Kohlen weisen komplexe und sehr variationsreiche Molekülstrukturen auf, die zu vielschichtigen Reaktionsmechanismen bei deren thermischer Zersetzung führen. Eine all-

gemeingültige Formulierung der chemischen Reaktionen beim Pyrolyseprozess ist daher nicht möglich. Zusätzlich zu den rohstofflichen Einflussgrößen hängen die Produktverteilung und die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte maßgeblich von verfahrenstechnischen und apparativen Parametern ab.

Tab. 1 stellt die Ergebnisse der Immediatanalyse nach DIN-Standards und zur Produktverteilung bei der Pyrolyse bei 600 °C in einem Festbettreaktor für ausgewählte Einsatzstoffe gegenüber.

Aufgrund des hohen Gehalts an flüchtigen Bestandteilen (ca. 75–85 Ma.-% wf) in Biomassen bilden sich bei der Pyrolyse insbesondere große Mengenanteile an flüssigen Produkten (Teere/Öle, Zersetzungswasser), die jedoch einen sehr hohen Sauerstoffgehalt aufweisen. Mit steigendem Inkohlungsgrad der in den Prozess eingebrachten Substanzen nehmen die Gehalte an flüchtigen Bestandteilen und Sauerstoff ab und der an Kohlenstoff zu. Dies führt im Ergebnis der Pyrolyse zu höheren Ausbeuten an Koks und einem deutlichen Rückgang des Anteils an flüssigen Produkten (*s. Abb. 2, links*).

1 Deutsches Energierohstoffzentrum Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC), TU Bergakademie Freiberg, d.reichel@iec.tu-freiberg.de, jan.friedemann@iec.tu-freiberg.de
2 IEC, TU Bergakademie Freiberg, steffen.krzack@iec.tu-freiberg.de

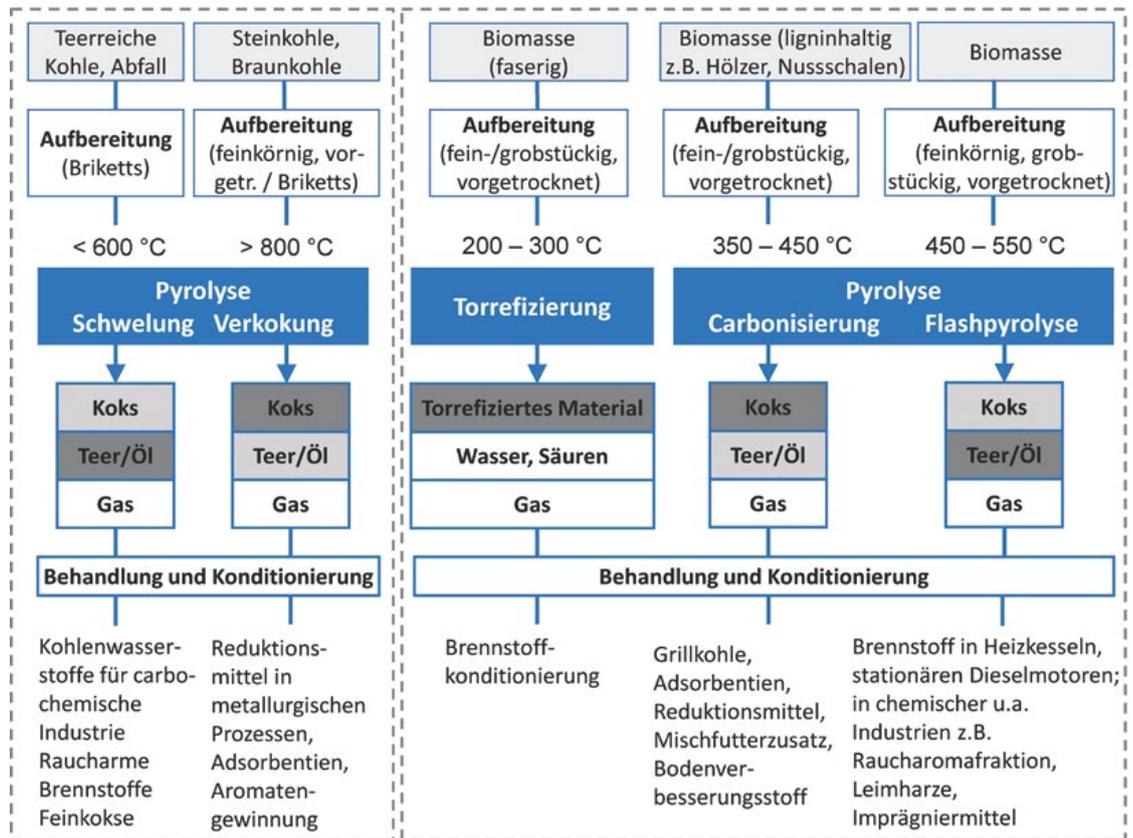


Abb. 1: Verfahren, Produkte und Anwendungsfelder der Kohle- und Biomassepyrolyse (nach [2])

Das Zersetzungsverhalten der Biomassen wird maßgeblich durch die Struktur und die Anteile der in ihnen enthaltenen Stoffgruppen Hemicellulose, Cellulose und Lignin bestimmt. Sie zeigen bereits bei ca. 150 °C Prozess-temperatur erste Reaktionen. Die Haupt-zersetzungsphase des Weizenstrohs tritt aufgrund des höheren Anteils an thermisch instabilen Hemicellulosen am frühesten – bei noch relativ moderaten Temperaturen – ein; danach folgt das Sägereestholz (höherer Cellulosegehalt) (s. Abb. 2). Bis ca. 400 °C ist die Zersetzung der Stoffe dieser beiden Gruppen weitgehend abgeschlossen, und es folgt

Tab. 1: Immediatanalyse und Pyrolyseproduktverteilung (Festbett, 600 °C, 90 K/min) verschiedener biogener und fossiler Kohlenstoffträger

	Sägereestholz (Fichte, rindenfrei)	Weizenstroh	Mitteldeutsche Braunkohle	Südafrikanische Steinkohle, aschereich
Immediatanalyse in Ma.-%				
Wasser (roh)	6,1	6,8	44,1	4,9
Asche (wf)	0,3	8,2	17,6	30,6
Flüchtige Bestandteile (wf)	85,7	73,2	52,8	25,1
Fixer Kohlenstoff (wf)	14,0	18,6	29,6	44,3
Pyrolyseproduktverteilung in Ma.-% (wf) bei 600 °C, 90 K/min im Festbettreaktor				
Koks	22,0	30,2	57,1	86,0
Kondensat, gesamt	62,1	45,7	31,3	8,3
– Teer/Öl	41,9	25,9	22,9	1,5
– Zersetzungswasser	20,2	19,8	8,4	6,8
Gas	15,9	24,1	11,6	5,7

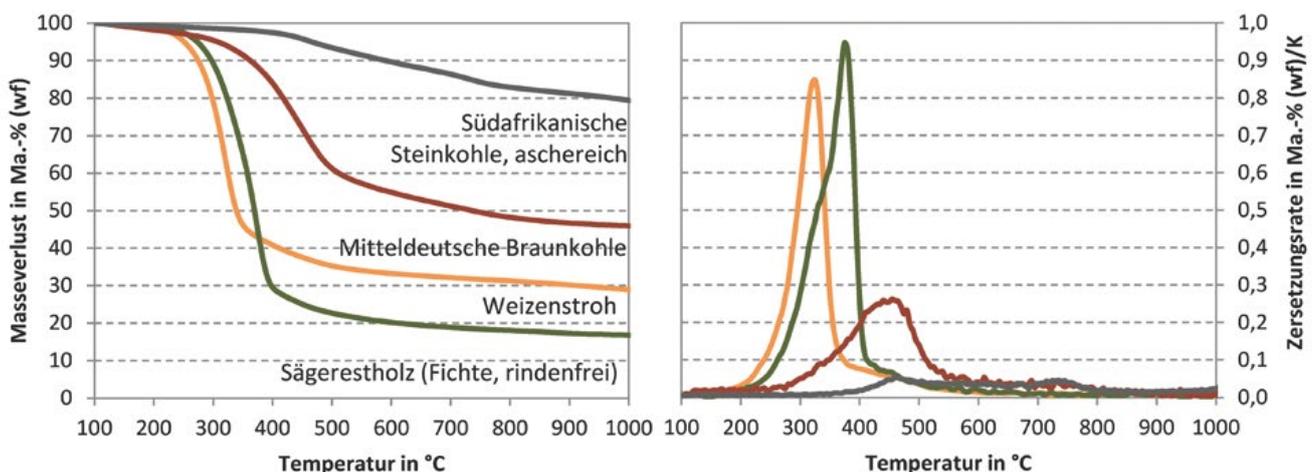


Abb. 2: Masseverlust und Zersetzungsrate bei der Pyrolyse verschiedener Kohlenstoffträger bis 1000 °C in der Thermowaage (Aufheizrate: 20 K/min)

im Bereich bis 600 °C der Abbau des Lignins. Die pyrolytische Zersetzung der Braunkohle erstreckt sich über den Temperaturbereich zwischen 280 und 800 °C, wobei ihre Hauptphase bei ca. 500 °C endet. Bis zu dieser Temperatur werden alle kondensierbaren Komponenten freigesetzt. Die Steinkohle zeigt erst ab ca. 400 °C erste Zersetzungserscheinungen.

Co-Nutzung von Kohle und Biomasse in thermochemischen Wandlungsverfahren

Die Chancen, die aus einer Co-Nutzung von fossilen und nachwachsenden Rohstoffen wie auch diverser organischer Abfälle in thermochemischen Konversionsverfahren resultieren, lösten seit Ende der 1990er-Jahre verstärkt Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet aus. Die Gründe hierfür lagen im Wesentlichen in der möglichen Substitution fossiler Energieträger mit dem Effekt der Ressourcenschonung und einer Verbesserung der Emissionssituation, in der Kostenreduktion durch die Verwertung von Ersatzbrennstoffen und landwirtschaftlichen Abfallprodukten (wie etwa Stroh), vor allem aber auch in der Möglichkeit, großtechnisch erprobte und kommerziell verfügbare Kohletechnologien auch für schwierigere Brennstoffe – wie Biomasse – anwendbar zu machen. Dies eröffnet auch Chancen, bei deren Mononutzung auftretende Probleme (z. B. im Bereich Korrosion, Verschlackung und Ansatzbildung) teilweise zu überwinden. Während die Co-Verbrennung von Kohle und Biomasse bzw. Klärschlamm Stand der Technik ist und die direkte und indirekte Co-Vergasung von Kohle und Biomasse bzw. Abfall ebenfalls bereits im großtechnischen Maßstab demonstriert wurde, gibt es im Bereich der Co-Pyrolyse bislang lediglich Forschungsaktivitäten.

Co-Pyrolyse von Kohle und Biomasse – Stand des Wissens

Bei der Co-Pyrolyse werden mindestens zwei Einsatzstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften gemeinsam thermisch zersetzt. Im einfachsten Fall ist die Beschreibung des Konversionsverhaltens der Brennstoffmischungen über die Mischungsregel aus dem Verhalten der einzelnen Rohstoffe im Umwandlungsprozess möglich (additives Verhalten). Angesichts unterschiedlicher Eigenschaften der zum Einsatz kommen-

den Rohstoffe und des – daraus resultierend – differentiellen Zersetzungsverhaltens der Bestandteile kann es jedoch im Prozessverlauf zu Wechselwirkungen zwischen den intermediär gebildeten Produkten kommen, was zu einer Veränderung der Produktzusammensetzung und des Spektrums der Produkteigenschaften führt (synergistische Effekte). Zur Aufklärung der grundlegenden Mechanismen beim Einsatz verschiedener Kohle-/Biomasse-mischungen wurden zahlreiche Forschungsarbeiten initiiert, die ein breites Feld an Prozessparametern, Reaktortypen und Einsatzstoffen abdecken.

Die Arbeiten dienen im Wesentlichen dem Ziel der Aufklärung der Reaktionskinetik bzw. des chemischen Verhaltens der Stoffkomponenten bei der Pyrolyse als Teilschritt von Co-Verbrennungs- und Co-Vergasungsprozessen, der Beeinflussung der Kokeigenschaften (insbesondere seiner thermoplastischen Eigenschaften) beim Einsatz im Hochofen (mit der Perspektive der partiellen Substitution von preisintensiven, qualitativ hochwertigen Koks-kohlen durch CO₂-neutrale, preisgünstigere Einsatzstoffe), – ferner der Beeinflussbarkeit der Flüssigproduktausbeute und -qualität im Hinblick auf die Herstellung carbochemischer Produkte bzw. von Kraftstoffen und letztlich auch der Herstellung von raucharmen Brennstoffen (Briketts).

Im Unterschied zu Studien, die das Auftreten synergistischer Effekte bei der Co-Pyrolyse von Kohle und Biomasse nachweisen konnten [u. a. 6–12], stellten andere Forschergruppen ein lediglich additives Verhalten fest [u. a. 4–6]. Die Ursachen hierfür liegen in der Abhängigkeit des Konversionsverhaltens der Einsatzstoffe von den Prozessbedingungen, den Rohstoffeigenschaften und den Mischungsverhältnissen [9]. Hohe Aufheizraten, eine gute Kontaktierung der Einsatzstoffe und Reaktionsprodukte, niedrigere Inkohlungsgrade [10] und hohe Zumischraten [7, 8] führen am ehesten zum Auftreten synergistischer Effekte. Wechselwirkungen bei der Co-Pyrolyse in Festbettreaktoren äußern sich häufig in einer verstärkten Freisetzung flüchtiger Bestandteile (Teer/Öl [8, 10], Gas [7,9] bzw. von beidem [11, 12]) sowie in einer entsprechend verringerten Ausbeute an Koks [8–12]. Soncini et al. sehen Teer als primäres Produkt der Wechselwirkungen an und führen eine gesteigerte Gasbildung auf sekundäre

Crackreaktionen der Teermoleküle infolge längerer Verweilzeiten bei höheren Temperaturen zurück [10]. Die verstärkte Gasentbindung resultiert aus größeren Ausbeuten an CO [7, 9, 12], aber auch an CH₄ [9,11] bzw. an sonstigen niedermolekularen Kohlenwasserstoffen [12].

Gründe für die auftretenden Synergieeffekte liegen im vergleichsweise höheren H/C-Verhältnis der Biomassen (1,3 bis 1,6 gegenüber 0,8 bis 1,0 für Braunkohle bzw. 0,5 bis 0,8 für Steinkohle), sodass diese als Wasserstoffdonator fungieren [9, 11]. Bei der Pyrolyse werden chemische Bindungen – insbesondere von funktionellen Gruppen – gespalten. Daraus resultieren kleinere, reaktionsfreudige Bruchstücke (Radikale), die im weiteren Verlauf repolymerisieren, in dann wiederum andere Molekülbruchstücke gespalten oder in Abhängigkeit vom vorherrschenden Wasserstoffpartialdruck abgesättigt werden [13]. Bei der Kohlepyrolyse limitiert das geringere H/C-Verhältnis der Einsatzstoffe die Ausbeute an z. B. Olefinen und BTX-Aromaten. Aufgrund der Wasserstoffübertragung aus der Biomasse und deren hohen Gehalts an flüchtigen Bestandteilen werden Vernetzungs- bzw. Rekombinationsreaktionen zwischen aus der Zersetzung der Kohle herrührenden radikalischen Bruchstücken unterbunden (Absättigung von Molekülfragmenten). Daraus resultiert eine Erhöhung des Anteils und eine Verbesserung der Qualität der flüssigen Produkte.

Das bei der Pyrolyse von Biomasse gebildete Zersetzungswasser kann Reaktionspartner für die entstandenen Teere sein (Steamcracken) [9, 11]. Eine Begünstigung der Kohlezersetzung bei niedrigeren Temperaturen soll auch durch Wärme aus exothermen Reaktionen der Biomassezerersetzung eintreten [9, 11]. Zudem wird ein signifikanter katalytischer Einfluss der mineralischen Komponenten (z. B. Alkali-, Erdalkalimetallionen in Biomassen) auf die pyrolytische Zersetzung vermutet [7].

Zur Charakterisierung der bei der Co-Pyrolyse freigesetzten kondensierbaren flüchtigen Bestandteile existieren bisher nur wenige Forschungsarbeiten. Diese zeigen aber, dass Synergien, wie z. B. eine verringerte Ausbeute an mehrkernigen aromatischen Verbindungen [4, 6] sowie erhöhte Anteile an aromatischen und aliphatischen C-H-Verbindungen unter Abnahme des Anteils von Alkenen [8], auftreten.

Abb. 3 (links): Rohbraunkohle aus dem Lausitzer Revier (oben), Weizenstrohpellets, zerkleinert (unten) – Ausgangsstoffe für die Untersuchungen zur Co-Pyrolyse am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

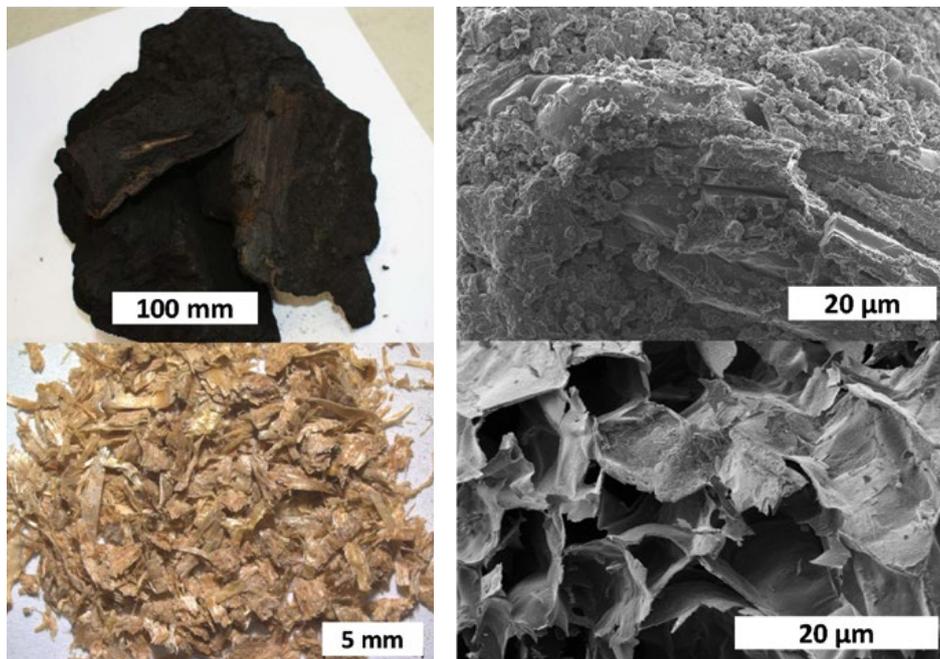


Abb. 4 (rechts): Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen von Koks aus Lausitzer Braunkohle (oben) und Weizenstroh (unten) pyrolysiert bei 800 °C

Die Koke wurden im Rahmen der Untersuchungen zur Co-Pyrolyse am IEC in einem Festbettreaktor hergestellt.

Forschung im Bereich Co-Pyrolyse und Co-Vergasung am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC)

In Anknüpfung an frühere Untersuchungen zur Co-Vergasung von Kohle/Abfall-Gemischen und zur Mitverbrennung von Klärschlämmen sowie Biomassepyrolysegasen in Kraftwerken sind Prozesse der Co-Pyrolyse und Co-Vergasung von Kohlen und Biomassen im Rahmen des Projekts Deutsches Energierohstoffzentrum, Freiberg (DER) Gegenstand der Forschung. Neben dem Ziel, den Rohstoffeinsatz für stoffgeführte Kohleveredlungsketten zu optimieren, sind in Abhängigkeit von der Kohlezusammensetzung sinnvolle Co-Nutzungs-Regime mit Biomasse zu ermitteln. Im Rahmen des Projekts wurde bisher u. a. die Co-Pyrolyse von deutschen Braunkohlen zusammen mit Weizenstroh im Festbettreaktor untersucht, wobei neben dem Mischungsverhältnis der Einsatzstoffe die Pyrolysetemperatur und das Kontaktregime der Partikel variiert wurden.

In Abhängigkeit von der verwendeten Kohle zeigte sich ein unterschiedlicher Einfluss dieser Parameter. Während bei der Co-Pyrolyse von Lausitzer Braunkohle und Weizenstroh lediglich additives Verhalten auftrat, waren bei rheinischer und Schöningener Braunkohle (plus Weizenstroh) Wechselwirkungen zu beobachten. Mit der rheinischen Braunkohle wurden signifikant höhere Flüssigproduktmengen bei gleichzeitig abnehmender Koksausbeute erzielt. Die

Co-Pyrolyse der Schöningener Braunkohle mit Weizenstroh hingegen führte zu einer stärkeren Koks- und einer verminderten Gasbildung. Eine erhöhte Schwefelfreisetzung aus dem Feststoff und eine Abnahme des Anteils der niedermolekularen, gasförmigen Kohlenwasserstoffe (C1–C3) sowie von Wasserstoff war bei beiden Braunkohlenarten festzustellen. Die Ergebnisse erklären die teilweise widersprüchlichen, von der Literatur reflektierten Angaben. Sie bestätigen den wesentlichen qualitativen und quantitativen Einfluss der Kohleeigenschaften auf das Eintreten synergistischer Effekte.

Fazit

Im Interesse einer zukünftig verstärkt stofflich orientierten Nutzung der Kohle kann aus den genannten Gründen eine mit Biomasse als nachwachsendem Rohstoff gemeinsame Umwandlung sinnvoll sein. Da pauschale Aussagen aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen auf den Pyrolyseprozess nicht möglich sind, ist die Aufklärung der bei diesem Prozess im Einzelnen ablaufenden chemischen Reaktionsmechanismen notwendig. Auf Basis der bisher erzielten Erkenntnisse sowie im Weiteren zu betreibender systematischer, experimenteller Untersuchungen sind die optimalen Prozessbedingungen zu identifizieren, unter denen eine gezielte Beeinflussung bzw. Steuerung der Qualität sowie der Ausbeute an Koks und Flüssigprodukten (bzw. an speziellen Fraktionen) möglich ist.

Literatur

- 1 DGMK e.V., Dechema e.V. [Hrsg.]: Positionspapier Kohleveredlung. DGMK 2009
- 2 Krzack, S.: Wie nutzen wir die Kohlen im Jahre 2050. Vortrag zur 75. Arbeitskreissitzung Kohleveredlung der DGMK, Hamburg, 27.10.2011
- 3 Rammler, E.; v. Alberti, H.-J.: Technologie und Chemie der Braunkohlenverwertung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1962
- 4 Abovade, A.O.; Carrier, M.; Meyer, E.L.; Knoetze, H.; Görgens, J.F. (2013): Slow and pressurized co-pyrolysis of coal and agricultural residues. In: Energy Conversion and Management 65, S. 198–207
- 5 Collot, A.-G.; Zhuo, Y.; Dugwell, D. R.; Kandiyoti, R. (1999): Co-pyrolysis and co-gasification of coal and biomass in bench-scale fixed bed and fluidised bed reactors. In: Fuel 78, S. 667–679
- 6 Jones, J.M.; Kubacki, M.; Kubica, K.; Ross, A.B.; Williams, A. (2005): Devolatilisation characteristics of coal and biomass blends. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 74 (1–2), S. 502–511
- 7 Kreckkaiwan, S.; Fushimi, C.; Tsutsumi, A.; Kuchonthara, P. (2013): Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal. In: Fuel Processing Technology 115, S. 11–18
- 8 Onay, Ö.; Bayram, E.; Koçkar, Ö. M. (2007): Copyrolysis of Seyitömer–Lignite and Safflower Seed: Influence of the Blending Ratio and Pyrolysis Temperature on Product Yields and Oil Characterization. In: Energy Fuels 21 (5), S. 3049–3056
- 9 Park, D. K.; Kim, S. D.; Lee, S. H.; Lee, J. G. (2010): Co-pyrolysis characteristics of sawdust and coal blend in TGA and a fixed bed reactor. In: Bioresource Technology 101 (15), S. 6151–6156
- 10 Soncini, R. M.; Means, N. C.; Weiland, N. T. (2013): Co-pyrolysis of low rank coals and biomass: Product distributions. In: Fuel 112, S. 74–82
- 11 Sonobe, T.; Worasuwannarak, N.; Pipatmanomai, S. (2008): Synergies in co-pyrolysis of Thai lignite and corncob. In: Fuel Processing Technology 89 (12), S. 1371–1378
- 12 Yuan, S.; Dai, Z.-H.; Zhou, Z.-J.; Chen, X.-L.; Yu, G.-S.; Wang, F.-C. (2012): Rapid co-pyrolysis of rice straw and a bituminous coal in a high-frequency furnace and gasification of the residual char. In: Bioresource Technology 109, S. 188–197
- 13 Reimert, R.: Die thermochemische Kohleveredlung. In: Schmalfeldt, J. (Hrsg.): Die Veredlung und Umwandlung von Kohle. Technologien und Projekte 1970–2000 in Deutschland. DGMK e.V., Hamburg 2008, Kapitel 2, S. 3



Abb. 1: Syngas-To-Fuel-Technikumsanlage am IEC

Entwicklung einer neuen Technologie zur Herstellung von hochoktanigem Benzin aus Synthesegas

Verbundforschung an der STF-Anlage
des Instituts für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

Peter Seifert¹, Bernd Meyer¹, Mario Kuschel², Joachim Engelmann²

Die Weltjahresförderung an Erdgas (einschließlich Erdölbegleitgas) betrug im Jahr 2010 rund 4 Bill. m³ brutto [1]. Neben 483 Mrd. m³/a für die Re-Injizierung, die dem Aufrechterhalten des Lagerstättendrucks bei der Erdölförderung dient, blieben weitere 120 Mrd. m³/a ungenutzt (zum Vergleich: der Erdgasjahresverbrauch Deutschlands beträgt rund 96 Mrd. m³/a [2]), die als Erdölbegleitgas entweder unter CO₂-Freisetzung abgefackelt oder aber direkt abgeblasen wurden, wobei abgeblasenes Methan 21 Mal klimaschädlicher ist als CO₂.

Ein Abtransport der Erdölbegleitgase

per Pipeline ist bei abgelegenen Lagerstätten wirtschaftlich nicht realisierbar. Stattdessen bietet sich ihre Vor-Ort-Umwandlung in Flüssigprodukte (synthetische Kraftstoffe oder Chemierohstoffe) an. Dies ist ebenso für Länder, die große Erdgas- und keine oder nur geringe Erdölvorkommen besitzen, interessant.

¹ Dr.-Ing. Peter Seifert, Prof. Dr.-Ing. Bernd Meyer (TU Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen)

² Dr.-Ing. Mario Kuschel, Dipl.-Ing. Joachim Engelmann (Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH)

Um aus Erdgas Kraftstoff zu erzeugen, wird im ersten verfahrenstechnischen Schritt ein H₂- und CO-reiches Synthesegas mittels Vergasung, die mit angepasster Gasreinigung alternativ auch den Einsatz von Kohle oder nachwachsenden Rohstoffen gestattet, erzeugt.

Die für den zweiten Schritt heute auf dem Markt verfügbaren Technologien zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen: die direkte katalytische Umwandlung des Synthesegases in flüssige Kohlenwas-

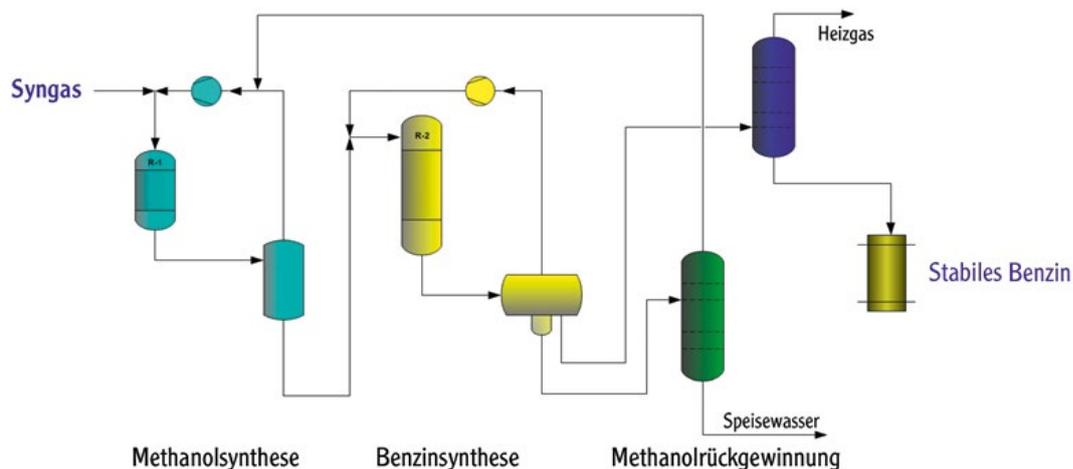


Abb. 2: Verfahrensfließbild STF

serstoffe und in die indirekte katalytische Umwandlung des Synthesegases in Flüssigprodukte via Methanol. Allen diesen Technologien ist gemein, dass der Investitionsaufwand für eine großtechnische Anlage zur Erzeugung von Benzin bzw. Diesel aus Synthesegas sehr hoch ist.

Die primären Produkte aus der Umwandlung von Synthesegasen durch die Fischer-Tropsch-Synthese oder der Umwandlung von aus Synthesegas erzeugtem Methanol müssen in nachgeschalteten Prozessen (Hydrocracken, Oligomerisierung, Isomerisierung, Destillation) weiterverarbeitet werden, damit hieraus schließlich Benzin bzw. Diesel gewonnen wird. Dabei haben diese Produkte aber noch nicht die gewünschte Endqualität. Das Benzinprodukt ist niedrigoktanig und muss in einem Nachfolgeprozess (Reforming, Isomerisierung) entsprechend veredelt werden. In einigen Prozessen weist das Benzinprodukt hohe Gehalte der unerwünschten Verbindung Durol auf, die durch eine nachgeschaltete Hydroisomerisierung in Kraftstoff umgesetzt werden muss.

Das neuartige STF-Verfahren, das die vorgenannten Probleme überwindet, konnte im Verbundforschungsvorhaben *Entwicklung einer neuen Technologie zur Herstellung von hochoktanigem Benzin aus Synthesegas* von den Projektpartnern Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH (CAC) und TU Bergakademie Freiberg designt, in den Technikumsmaßstab umgesetzt und in einer Versuchsanlage am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) erprobt werden.

Das Forschungsvorhaben begann im August 2008 mit der Bauplanung und der Reaktorauslegung. Parallel zur Errichtung und Inbetriebnahme der Tech-

nikumsanlage wurden vom IEC und dem Institut für Technische Chemie Geräte für die Kraftstoff- und Synthesegasanalytik beschafft bzw. angepasst sowie produktspezifische Probebehandlungs- und Messsequenzen erarbeitet. Im Juni 2010 konnte an der STF-Anlage, die das Synthesegas aus der seit 2003 am IEC betriebenen HP-POX-Anlage bezieht, der Versuchsbetrieb aufgenommen werden.

Die Synthese hochoktanigen Benzins erfolgt in zwei Stufen: Einer vorgegeschalteten Methanolsynthese, die bis zu 700 m³ (i.N.)/h Synthesegas verarbeitet, folgt in einem zweiten Reaktor die Benzinsynthese mit einer Nennleistung von 120 l Benzin pro Stunde. Wesentliche Apparateauslegungs- und Prozessführungsprinzipien sowie Verfahrensbestandteile, wie beispielsweise die isothermen Reaktoren, die Art der Wärmeabführung, die Reaktionsbedingungen und der speziell abgestimmte Katalysator, unterscheiden sich von konkurrierenden Verfahren, wie dem TIGAS-Verfahren von Haldor Topsoe oder dem MtSynfuels-Verfahren von Lurgi, durch anlagen- und prozesstechnische Verbesserungen. Das primäre Benzinprodukt entspricht nach einer simplen destillativen Aufarbeitung in seiner chemischen Zusammensetzung EU- und GOST-Normen. Hervorzuheben ist auch die abwasserfreie Arbeitsweise, basierend auf einer integrierten Aufarbeitung des anfallenden methanolhaltigen Wassers.

Seit 2010 wurden insgesamt sieben, teils bis zu sechswöchige Versuchskampagnen gefahren. Hierbei standen das Auffinden und Optimieren der Reaktionsbedingungen im 1. und 2. Reaktor im Mittelpunkt der Untersuchungen. In 149 Betriebstagen, die das mehrtägige Aufheizen und Abkühlen der Prozess-

stufen einschließen, wurden insgesamt 79.053 kg Benzin synthetisiert.

Begleitet wurden die Versuche durch wissenschaftliche Mitarbeiter und Doktoranden, die Arbeiten zur Modellierung von Teilprozessen, zur Bilanzierung und zur Gesamtsystemanalyse des mit der HP-POX-Anlage gekoppelten Verfahrens sowie Untersuchungen zur Reaktivität und Selektivität der Katalysatoren durchführten.

Anhand der Investitionskosten für die Versuchsanlage und der erreichten Versuchsergebnisse (gleiche bzw. höhere Qualität des Benzins bei weniger Ausrüstungen) werden von CAC marktwirtschaftliche Analysen zur neuen Technologie erarbeitet. Erste kommerzielle Anwendungen werden in den ehemaligen GUS-Staaten mit den CAC-Projektpartnern (SAPR Neftechim/Russland und Techno Trading Ltd./Kasachstan) erwartet. Ziele der weiteren Technologieentwicklung sind der Nachweis der Dauerstandfestigkeit des Katalysators und die Erarbeitung eines einstufigen Verfahrens, das ggf. modular aufgebaut sein wird.

Das Verbundforschungsvorhaben, das im September 2013 seinen Abschluss fand, wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Freistaates Sachsen gefördert.



Quellen

- 1 US Department of Energy - Energy Information Administration. <http://www.eia.gov>, abgerufen Juli 2013
- 2 Kurzstudie „Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2011“. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, November 2011.

Virtualisierung von Hochtemperaturprozessen am ZIK VIRTUHCON

Stefan Guhl, Andreas Richter, Christian Hasse, Bernd Meyer

Einleitung

Bereits 2010 wurde das an der TU Bergakademie angesiedelte Projekt VIRTUHCON (Virtual High Temperature Conversion Processes) in der Zeitschrift des VFF vorgestellt [Nr. 17 (2010) S. 27–32]. Im Folgenden wird darauf aufbauend der in den letzten Jahren erzielte Projektfortschritt beschrieben.

Im Mittelpunkt des Projekts steht die Virtualisierung von Hochtemperaturkonversionsprozessen, d.h. die Erfassung und möglichst adäquate Abbildung realer Prozesse mittels mathematisch-naturwissenschaftlicher Modelle und ihre vorausschauende Simulation. Die Abb. 1 im o.g. Beitrag zeigte bereits in schematischer Form die wichtigsten Schritte, die zwecks Optimierung, Umgestaltung und Neukonzipierung von Prozessen sowie zur Generierung neuer Lösungsansätze auf Basis der erstellten Modelle und Simulationen zu gehen sind.

Der Forschungsansatz von VIRTUHCON ist neu. Eine detaillierte Abbildung der Prozesse – sowohl auf der Makro- als auch auf der Mikroebene – macht es möglich, ihre Optimierung zukünftig verstärkt auf der Basis von Computersimulationen zu betreiben. Die virtualisierte Prozessentwicklung und -neugestaltung sollte die Entwicklungs- und Optimierungszyklen deutlich verkürzen und die Notwendigkeit kostenintensiver Zwischenschritte – z. B. die Prototypenentwicklung in Verbindung mit dem stufenweisen Hochskalieren der Prozesse – spürbar mindern.

Gegenstand der derzeitigen Projektphase sind die Prozesse der Kohlevergasung. In solchen autothermen Prozessen sollen Kohlepartikel unter Zugabe von Sauerstoff und Wasserdampf in ein kohlenmonoxid- und wasserstoffreiches Synthesegas überführt werden, wobei – verfahrensabhängig – Temperaturen bis zu 1.800 °C und Drücke bis zu 40 bar vorherrschen und technisch zu beherrschen sind. Um alle ablaufenden Teilprozesse lückenlos zu erfassen und schließlich anhand von Modellen abzubilden, wird ein ebenfalls im o.g. Beitrag als Abb. 2 dargestellter, strukturierter, dreigliedriger Forschungsansatz verfolgt.

Ausgehend vom Kohle- bzw. Koks-partikel müssen zunächst alle relevanten Vorgänge, die am und im Partikel ablaufen, beschrieben werden. Der Nachwuchsforschergruppe *Multiphasige Stoffsysteme* obliegt es, die chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften sowie die mit den Wechselwirkungen zwischen allen beteiligten Phasen einhergehenden Stoffumwandlungen zu erfassen und zu beschreiben. Dazu gehören u. a. die Aufklärung der Kinetik der heterogenen Oberflächenreaktionen und das Verhalten der mineralischen Stoffkomponenten. Die zunächst experimentell gewonnenen Daten werden dann von einer zweiten, der Nachwuchsforschergruppe *Grenzflächenphänomene*, zur Modellierung genutzt.

Numerische Simulationen des Verhaltens einzelner Kohlepartikel helfen dabei, die relevanten physikalischen Zusammenhänge zu identifizieren und qualifiziertere Submodelle zu entwickeln. Diese Modelle simulieren den Stoff-, Impuls- und Energietransport durch die bzw. an der Grenzschicht unter Berücksichtigung der diversen, heterogenen Oberflächenreaktionen und der damit verbundenen Änderung der Zusammensetzung und Struktur der Phasengrenzflächen. Daraus resultieren unter anderem Submodelle für die Partikelerwärmung und -trocknung, die Pyrolyse sowie dann für die Vergasung der Partikel.

Der Schwerpunkt der Arbeit der Forschungsgruppe *Reaktionsströmungssysteme* liegt auf der numerischen Simulation des Reaktors als Ganzes. Außer der möglichst adäquaten Beschreibung der turbulenten Strömungen und der in ihnen ablaufenden homogenen Gasphasenreaktionen, aus der sich die Rahmenbedingungen für den Wärme- und Stofftransport an der Grenzschicht ergeben, umfasst das Aufgabengebiet der Gruppe auch die Einbindung der erstellten Submodelle in die Gesamtsimulation.

Multiphasige Stoffsysteme

Die stoffliche Umsetzung eines Kohlepartikels in einem Vergasungsprozess

vollzieht sich über die Stufen Pyrolyse und Trocknung (Bildung von Koks und flüchtigen Bestandteilen), chemische Koksumsetzung durch heterogene Oberflächenreaktionen (Bildung von H₂ und CO) sowie Mineralstoffreaktionen (z. B. Entstehung einer schmelzflüssigen Schlacke aus der Kohleasche). Alle für die Prozessmodellierung relevanten Teilschritte sowie die chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften der beteiligten Phasen müssen erfasst und beschrieben werden. Dieser Aufgabebereich wird von der Gruppe *Multiphasige Stoffsysteme* hauptsächlich durch experimentelles Arbeiten wahrgenommen. Dort geht es vor allem um zwei Themenfelder, nämlich die Pyrolyse und die chemische Koksumsetzung (die dabei zum Tragen kommenden Kinetiken) sowie um das Verhalten der Mineralstoffe.

Der Schwerpunkt des ersten Themenfeldes liegt auf der Aufklärung der Kinetik der heterogenen Oberflächenreaktionen im Zusammenhang mit der sich ändernden Koksstruktur. Die Kohlepyrolyse wird vor dem Hintergrund bereits existierender Modelle und bereits verfügbarer experimenteller Daten nicht direkt untersucht, zumal namentlich die experimentelle Datengewinnung Gegenstand anderer Projekte am IEC (Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen) ist.

Die Produktausbeuten (Koks, Permanentgase, Kohlenwasserstoffe) lassen sich u. a. mittels Modellen wie dem FG-DVC-Modell (*Functional Group – Depolymerization, Vaporization and Crosslinking*) in Abhängigkeit von der Kohlequalität, der Aufheizrate und vom Druck abschätzen. Die Validierung des FG-DVC-Modells mit den am IEC erarbeiteten experimentellen Daten hat ergeben, dass dieses für die weitergehende Modellierung notwendige Daten in ausreichender Qualität liefert, insbesondere für die bei den meisten Vergasungsverfahren üblichen hohen Aufheizraten.

Die Charakterisierung der Porenstruktur ist – insbesondere im Hinblick auf die heterogenen Oberflächenreaktionen in Verbindung mit den Stofftrans-

portprozessen in den Koksporen – von erheblichem Interesse. Zur Erfassung dieser Struktur steht eine Reihe von Messtechniken zur Verfügung. Außer auf der Bestimmung der Roh- und der Reindichte (über die man auf die Porosität schließt) liegt das Augenmerk auf der spezifischen Koksoberfläche (BET).

Aufgrund des sehr intensiven Stoffumsatzes bei der Pyrolyse und der Koksvergasung erfährt die Porenstruktur eine ständige Änderung, was sich wiederum auf die Stofftransport- und die Kinetikparameter auswirkt. Zum Beispiel beträgt die spezifische Oberfläche von Braunkohle im getrockneten Rohzustand ca. $1\text{--}10\text{ m}^2/\text{g}$, nach abgeschlossener Pyrolyse bis zu $100\text{ m}^2/\text{g}$; im Gefolge der chemischen Kohlenstoffumsetzung durch heterogene Vergasungsreaktionen können Maxima von bis zu $700\text{ m}^2/\text{g}$ erreicht werden.

Das Ziel der Untersuchungen ist die umsatzabhängige Bestimmung dieser Parameter, um sowohl die an der jeweiligen Oberfläche ablaufende Reaktionskinetik als auch die Stofftransportvorgänge in den Koksporen besser beurteilen zu können. Die dafür notwendigen Koksproben mit unterschiedlichen Umsetzungsgraden werden im Wirbelschichtregime unter CO_2 -Atmosphäre präpariert, wobei die Temperatur und der Partikeldurchmesser variiert werden.

Die Reaktionskinetik für die Boudouardreaktion ($\text{C}_{(\text{s})} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$) wird derzeit auf Basis thermogravimetrischer Untersuchungen bei Drücken von bis zu 40 bar ermittelt. Ein Nachteil des Messprinzips (nicht durchströmte Schüttung) ist die Limitierung der Reaktionsgeschwindigkeit durch den Stofftransport bei Temperaturen ab 950 °C bis 1000 °C . Er wird durch die aktuell laufenden Untersuchungen im Fallstromreaktor umgangen, wie *Abb. 1* verdeutlicht. Mit dieser Versuchsanlage können Zustände, wie man sie in realen Vergasungsreaktoren vorfindet, sehr gut nachgebildet werden, was wiederum zu praxisrelevanten Daten führt. Diese Versuchsanlage wird in Kooperation mit dem IEC und dem DER (Deutsches Energierohstoff-Zentrum) betrieben.

Bei der Beschreibung des Verhaltens der Mineralstoffe steht zunächst insbesondere die Bestimmung von Stoffeigenschaften im Vordergrund. Schwerpunkt ist dabei die Schlackenviskosität. Diese ist nicht nur abhängig von Schlacken-zusammensetzung und -temperatur,

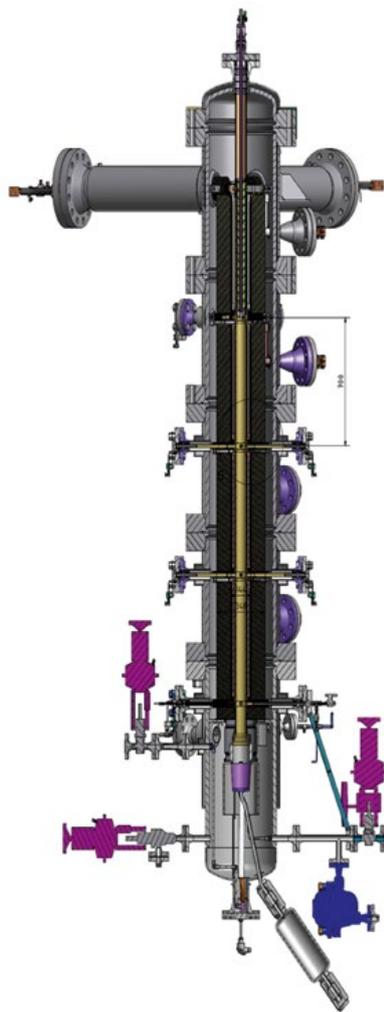


Abb. 1: Fallstromreaktor „KIVAN“
(Innendurchmesser 70 mm, $T < 1.600\text{ °C}$, $p < 100\text{ bar}$)

sondern infolge einer Kristallausfällung auch von der Schergeschwindigkeit. Experimentell werden dazu Messungen an einem Hochtemperaturviskosimeter durchgeführt, wobei sowohl der Einfluss der Eisenoxidationszahl (in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck) als auch der temperaturabhängigen Kristallbildung im Blickpunkt des Interesses stehen.

Theoretischerseits wird an der Verbesserung solcher Modelle gearbeitet, die den Einfluss der Teilkristallisation auf die Schlackenviskosität abbilden [M.A. Duchesne et al., Fuel 2012]. Ziel ist es, die Vorhersagegenauigkeit von Viskositätsmodellen zu verbessern, um den Aufwand für die zeit- und kostenintensiven Messungen zu verringern. Weitere experimentell zu bestimmende Stoffeigenschaften betreffen die Oberflächenspannung und die Dichte, zu deren Ermittlung die sessile-Drop- und die Maximum-Bubble-Pressure-Methoden Anwendung finden. Kohleartenspezifische

Datensätze werden an die Nachwuchsforschergruppe Grenzflächenphänomene übergeben, die auf deren Grundlage z. B. ein Modell zur Beschreibung der sich in Flugstromvergasern bildenden Schlackeschicht erstellt.

Um solche Probleme wie Mauerwerkskorrosion, Mobilisierung von Stör- und Schadstoffen (Schwefel, Chlor, Alkalien) oder das Aufschmelz- oder Agglomerationsverhalten der Brennstoffaschen abzuschätzen und zu beschreiben, wird auf thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen zurückgegriffen. Parallel zur Nutzung kommerziell verfügbarer Stoffdatenbanken (FACT) wird an der Erstellung einer eigenen Stoffdatenbank unter Anwendung der CALPHAD-Methode gearbeitet. Die notwendigen Stoffdaten werden teils aus der Literatur, teils auf der Basis von ab-initio-Berechnungen (Bildungsenthalpie, $c_p(T)$) sowie mittels kalorimetrischer Messungen ($c_p(T)$ -Funktion) gewonnen [L. Zhang et al., High Temperature Materials and Processes, 2012].

Grenzflächenphänomene

In einem Flugstromreaktor, beispielsweise der Versuchsanlage für Vergasungsprozesse der Brigham Young Universität (BYU), durchläuft der pulverförmige Brennstoff – je nach aktueller Position im Reaktor – eine Reihe unterschiedlicher Phasen. Hierzu zählen das Aufheizen der einzelnen Partikel, der Prozess des Trocknens der feuchten Kohle, das Bilden von Pyrolysegasen, die teilweise Verbrennung einzelner Partikel in der Flammenzone und die endotherme Stoffumwandlung der Kohlepartikel im Vergasungsteil des Reaktors. Diese einzelnen Phasen können nacheinander, aber auch parallel durchlaufen werden. Die hierfür typischen Zeitskalen reichen von Zehntelsekunden (Aufheizung) über Sekunden (Verbrennung) bis hin zu Minuten (Vergasung).

Die Nachwuchsforschergruppe Grenzflächenphänomene untersucht mithilfe der direkten numerischen Simulation die am Einzelpartikel ablaufenden Prozesse. Durch die Berechnung der Wärme- und Stoffübertragung sowie des Impulsaustauschs um das Partikel, d. h. innerhalb der Grenzschicht, gelingt es, die physikalischen Phänomene, die den jeweiligen Stoffumwandlungsprozess bestimmen, zu detektieren und funktionelle Abhängigkeiten zu identifizieren. Dies ermöglicht die Entwicklung neuer, funk-

tioneller Modelle zur effizienten Vorhersage der Stoffumwandlung und des Wärmetransports durch einzelne Partikel. Erst die Verfügbarkeit dieser Submodelle erlaubt die Simulation der Prozesse im gesamten Flugstromreaktor, in der eine Vielzahl einzelner Partikel en bloc erfasst werden muss. Beispiele hierfür sind das Trocknungsmodell von Schmidt et al. [Int. Conf. on Fluid Flow Technologies, 2012] oder das Partikelabbrandmodell von Schulze et al. [Oil and Gas Science and Technology, 2013].

In vorhergehenden Arbeiten wurde ein einfaches chemisches System, bestehend aus sechs Komponenten (O_2 , CO , CO_2 , H_2O , H_2 , N_2) und drei semi-globalen Gasphasenreaktionen, betrachtet.

Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich nun auf komplexere chemische Systeme, bestehend aus 24 Stoffen und 104 Reaktionen [DRM22, A. Kazakov and M. Frenklach, <http://www.me.berkeley.edu/drm/>]. Dies vereinfacht einerseits die Kopplung der Modelle mit den von der dritten Nachwuchsforschergruppe *Reacting Flow Systems* durchgeführten Reaktor-Simulationen. Andererseits sichert die Analyse des komplexeren chemischen Systems bereits gewonnene Erkenntnisse ab und ermöglicht die Untersuchung weiterer Prozesse, wie beispielsweise desjenigen der Zündung. Der damit verbundene hohe Rechenaufwand behindert eine gezielte Parametervariation, ermöglicht jedoch detailliertere Einsichten in die chemischen Prozesse reagierender Kohlepartikel. Als Beispiel für diesen Ansatz wurde, basierend auf Simulationen des BYU-Reaktors [Vascellari et al., *Fuel*, 2013], eine Reihe charakteristischer Punkte identifiziert.

Die *Abbildung 2* zeigt zwei dieser Punkte. Der erste liegt direkt in der Flammenzone des Reaktors. An diesem Punkt besitzt die Gasphase ca. 26 % O_2 , 27 % CO_2 und 31 % H_2O . An der Partikeloberfläche finden gleichzeitig exotherme, heterogene Reaktionen ($C + 0,5 O_2 \rightarrow CO$) sowie endotherme Vergasungsreaktionen ($C + CO_2 \rightarrow 2 CO$; $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$) statt.

In Abhängigkeit von der lokalen Oberflächentemperatur des Partikels übersteigen die Reaktionsgeschwindigkeiten der exothermen Reaktionen die der endothermen um mehrere Größenordnungen. Daher liegt in diesem Fall die Partikeltemperatur um 400 K über der Gastemperatur. Die Absenkung des Kohlendioxidgehalts am Partikel

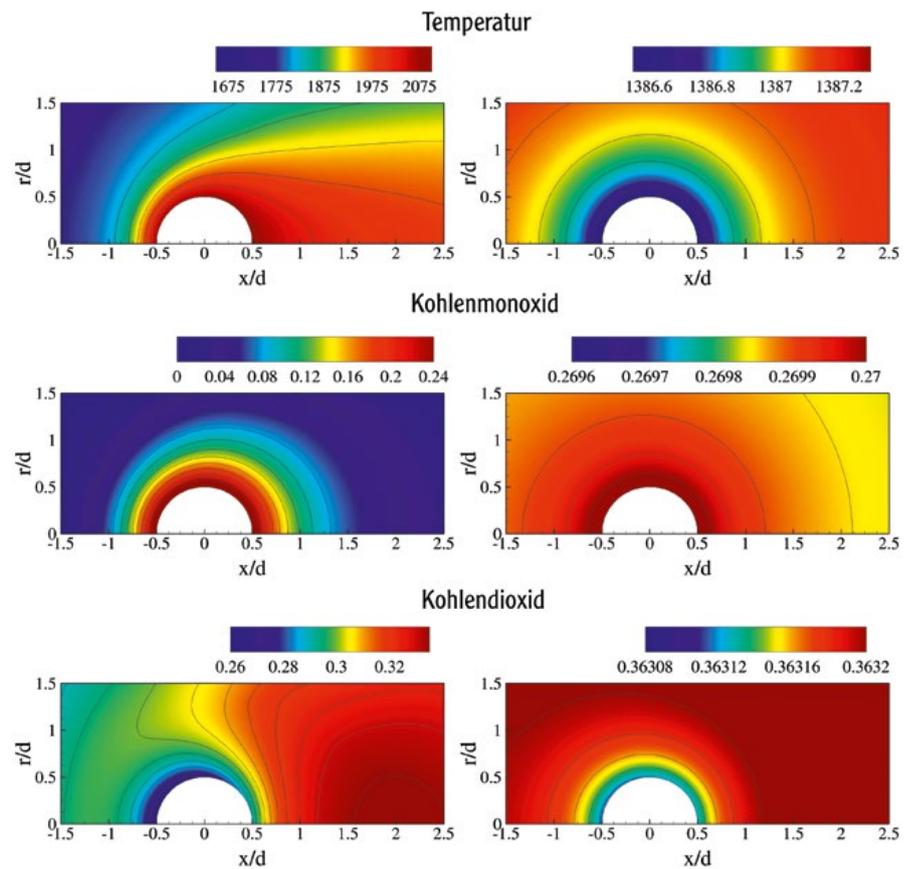


Abb. 2: Temperatur- und Stoffverteilungen rings um ein Einzelpartikel – an zwei verschiedenen Positionen des BYU-Reaktors. Linke Spalte: Flammenbereich, rechte Spalte: Vergasungsbereich

lässt sich auf die Boudouard-Reaktion ($C + CO_2 \rightarrow 2 CO$) zurückführen, bei der Kohlenstoff und Kohlendioxid zu Kohlenmonoxid reagieren. Im hinteren Bereich des Reaktors ändert sich das Partikel-Konversionsverhalten. Da dort Sauerstoffmangel besteht, finden lediglich endotherme Reaktionen statt, was eine Absenkung der Partikeltemperatur bedingt. Die niedrigeren Reaktionsgeschwindigkeiten der endothermen Vergasungsreaktionen bewirken eine nur geringe Stoffumwandlungsrate, was sich in einer entsprechend geringen Änderung der Stoffkonzentration um das Partikel widerspiegelt.

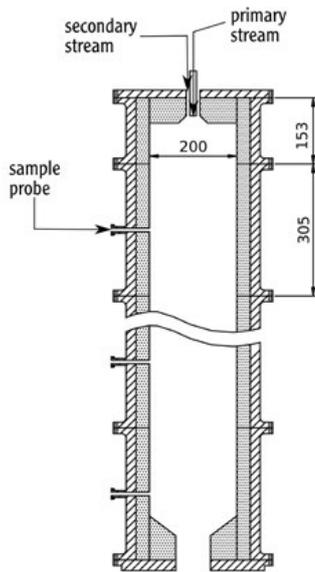
Ein weiterer relevanter Einflussparameter ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Partikel, gekennzeichnet durch die Reynoldszahl. Im Flammenbereich liegt die Reynoldszahl relativ hoch (≤ 10). Durch den Einfluss der Strömung verschiebt sich die Flammenzone um das Partikel auf die stromabgewandte Seite. Die Grenzschichtdicke verringert sich; dadurch wird der diffusive Transport von Reaktionsgasen zum Partikel beschleunigt. Im hinteren Bereich bewegen sich die Partikel etwa mit Strömungsgeschwindigkeit, sodass

der Einfluss der Reynoldszahl deutlich weniger ausgeprägt ist.

Reaktionsströmungssysteme

Die Forschungsgruppe Reaktionsströmungssysteme hat im Zentrum für Innovationskompetenz VIRTUHCON zwei Hauptaufgaben zu lösen. Zum einen entwickelt sie Modelle für die Beschreibung der turbulenten reaktiven Strömung im Reaktor unter Berücksichtigung von detaillierten chemischen Reaktionsmechanismen. Zum anderen führt die Forschungsgruppe die eigenen Ergebnisse und Modelle mit denen der beiden anderen Gruppen – Multiphasige Stoffsysteme und Grenzflächenphänomene – zu einem Gesamtsimulationsmodell zur Beschreibung von Vergasungsreaktoren zusammen.

Die Aussagekraft des integrierten Gesamtmodells soll anhand der Simulation eines für Forschungszwecke konzipierten Vergasungsreaktors demonstriert werden. Für die hierzu erforderlichen Berechnungen wurde das Einzelpartikelmodell der Gruppe Grenzflächenphänomene (siehe voriges Kapitel) in den CFD-(Computational Fluid Dynamics)-Löser implementiert. Dieses



	Utah bit.	Ill. 6 bit.	Wyo. sub.	N. Dak. lig.
Proximate analysis, % as received				
Moisture	2.4	6.7	15.0	19.0
Ash	8.3	10.4	5.8	6.1
Fix. carb.	43.7	43.5	40.4	39.8
Vol. matt.	45.6	39.4	38.8	35.1
Ultimate analysis, % daf				
C	77.60	75.34	68.67	61.78
H	6.56	5.29	4.75	4.51
O	13.88	12.95	24.89	31.26
N	1.42	1.58	1.16	1.07
S	0.55	4.84	0.53	1.29
HHV dry, MJ/kg	29.8	27.4	23.7	17.9

Abb. 3: Geometrie des Forschungsvergaser der Brigham Young University – BYU – (links) und die Charakterisierung der vier untersuchten Kohlen (rechts)

Partikelmodell wird kontinuierlich in einem zwischen den Gruppen laufenden Abstimmungsprozess weiterentwickelt und durch neue Kinetikdaten der Gruppe Multiphasige Stoffsysteme erweitert. Unter Verwendung des jeweils aktuellen Partikelmodells führt die Gruppe Reaktionsströmungssysteme Reaktorsimulationen durch.

Der Forschungen vorbehaltene Vergasungsreaktor der Brigham Young University (BYU – siehe Abb. 3) arbeitet nach dem Flugstromprinzip. Die Kohle und der Oxidator werden von oben her eingetragen, die Strömung ist nach unten gerichtet. Am unteren Auslass werden die Gase und die Koks/Aschepartikel entnommen. Der einfache, zylindrische Aufbau des Reaktors erlaubt darüber hinaus Gasprobenahmen entlang der Lauflänge sowohl in axialer als auch

in radialer Richtung. Die daraus gewonnenen Informationen sind essenziell für die wissenschaftliche Validierung und das physikalisch-chemische Verständnis des Gesamtreaktormodells unter Berücksichtigung der beschriebenen weiterentwickelten Modelle. Die Partikeldichte ist beim Flugstromverfahren so gering, dass der Abstand zwischen den einzelnen Teilchen ein Mehrfaches des Partikeldurchmessers beträgt, so dass die oben vorgestellte, am Einzelpartikel ansetzende Modellierung, gerechtfertigt ist.

In einer großangelegten Versuchsreihe [Smith et al., AIChE, 1988] wurden vier unterschiedliche Kohlearten (von Steinkohle bis Braunkohle – siehe Abb. 3) im BYU-Vergaser untersucht. Die signifikanten Unterschiede zwischen den vier Kohlen kommen auch in Abb. 4 im Van-

Krevelen-Diagramm zum Ausdruck. Die experimentellen Daten des BYU-Vergasers sind ein weltweit anerkannter Benchmark für die Simulation der Kohlevergasung. Gerade die signifikanten Unterschiede zwischen den eingesetzten Kohlen ermöglichen die Bewertung der prädiktiven Fähigkeiten der Modelle.

Nach dem Eintritt in den Reaktor ist die Aufheizrate der Kohlepartikel sehr hoch. Die Partikel werden in weniger als 1 ms auf Temperaturen von 1.500–2.500 K aufgeheizt. Während dieser Aufheizphase findet die Pyrolyse statt. Die freigesetzten Gase werden in der Flammenzone oxidiert, wodurch sich die Flamme am Brennermund stabilisiert. Die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile – sowohl ihre Rate als auch ihre Gesamtmasse – hängt stark von der Aufheizung und damit von der Trajektorie des Einzelpartikels im Reaktor ab. Zur Beschreibung des Pyrolyseprozesses reicht die Immediatanalyse (siehe Abb. 3) allein nicht aus, da das zugrundeliegende Laborexperiment bei vergleichsweise sehr niedrigen Heizraten und Endtemperaturen durchgeführt wird. Um die extremen Bedingungen im Vergasungsreaktor und ihre Auswirkung auf das Konversionsverhalten der Partikel zu modellieren, wurden im Rahmen dieser Arbeit die drei detaillierten Pyrolysemodelle

- Chemical Percolation Devolatilization – CPD Modell [Grant et al., Energy Fuels, 1989]
- Functional-Group, Depolymerization, Vaporization, Cross-Linking - FG-DVC [Solomon et al., Energy Fuels, 1988]
- FLASHCHAIN [Niksa, Energy Fuels, 1991]

auf Basis der Netzwerktheorie¹ in die Simulation integriert [Vascellari et al., 29th Pittsburgh Coal Conference 2012; Vascellari et al., Flow Turbulence and Combustion 2013; Vascellari et al., Fuel, 2013].

Diese Modelle wurden für schnelle Aufheizraten entwickelt und beschreiben die Zersetzung der molekularen Struktur, die Bildung des Metaplasts, die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile sowie die rekonstituierenden Reaktionen, die die finale Koksstruktur beschreiben. Alle Modelle zeigen einen

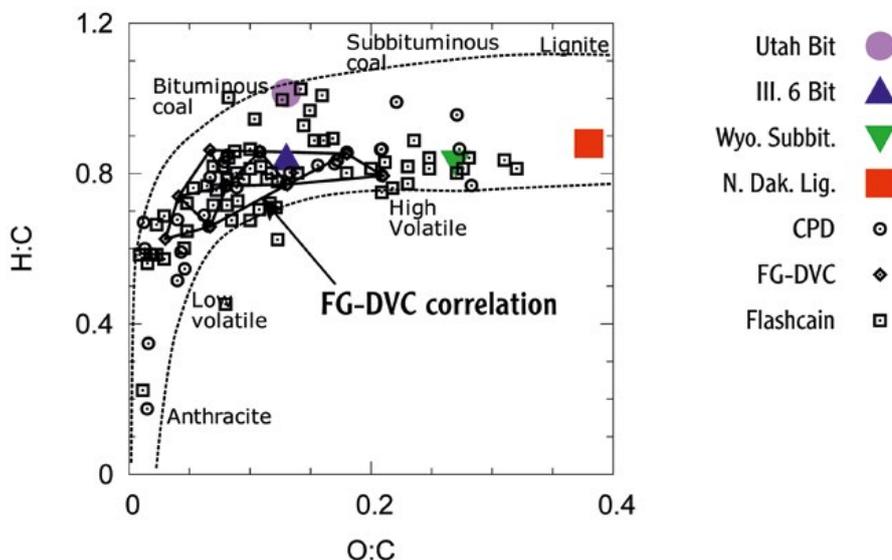


Abb. 4: Van-Krevelen-Diagramme der vier untersuchten Kohlen. Ebenfalls dargestellt sind die Gültigkeitsbereiche der Pyrolysemodelle CPD, FG-DVC und Flashchain.

¹ Beschreibung der Kohle auf Basis ihrer molekularen Struktur; solche detaillierten Untersuchungen können z. B. im Forschungsprojekt DER an der Bergakademie durchgeführt werden

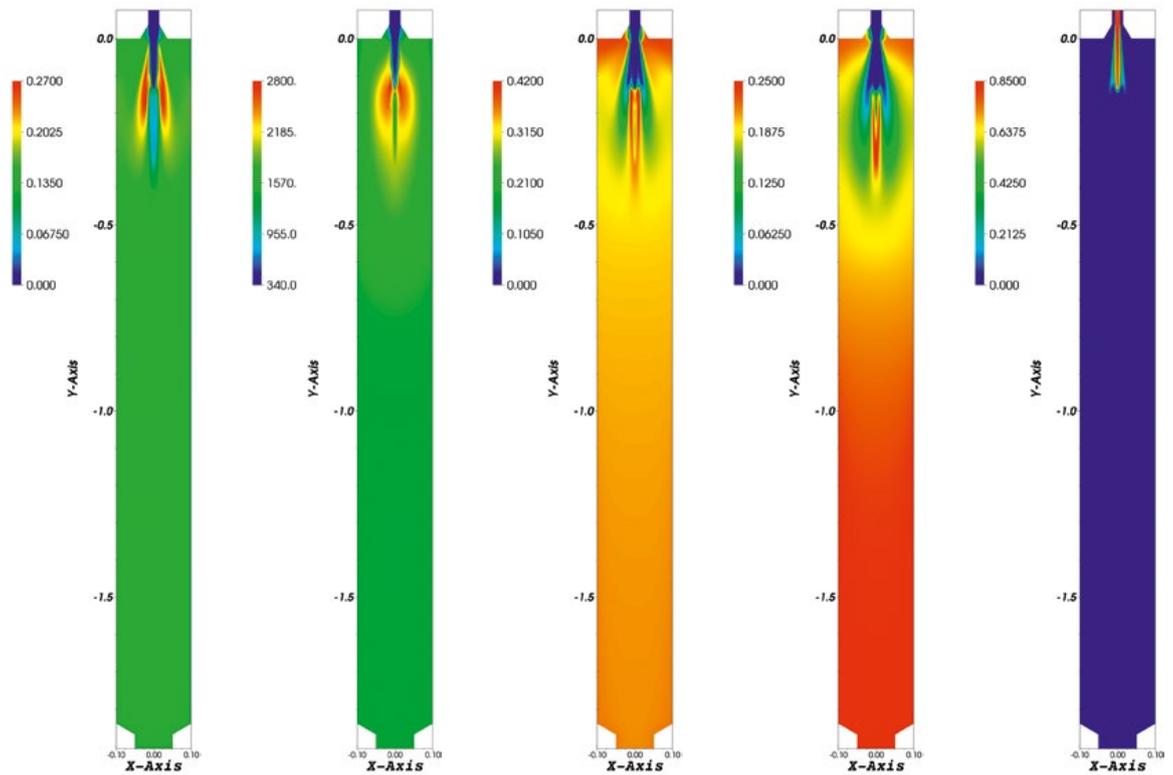


Abb. 5: CFD-Simulationsergebnisse im BYU-Forschungsvergaser mit Utah-Kohle, von links nach rechts: Temperatur, CO, CO₂, H₂ und O₂ (Molenbrüche)

starken Anstieg des Flüchtigengehalts gegenüber der Immediatenanalyse von bis zu 30%. Dieser Unterschied ist signifikant und muss in einer Gesamtsimulation verlässlich abgebildet werden, um die Flammenstruktur und deren Stabilisierung korrekt beschreiben zu können. Auch das Ergebnis für den Kohlenstoffumsatz wird davon beeinflusst, da sich der Kohlenstoffanteil im Koks gegenüber seinem Anfangswert in der eingesetzten Kohle durch eine hohe Freisetzung an Flüchtigen verringert. Da die Koksreaktionen vergleichsweise langsam ablaufen, insbesondere unter reduzierenden Bedingungen wie sie in Vergasungsreaktoren herrschen, bestimmen diese die zur Umsetzung des Kohlenstoffs im Reaktor benötigte Verweilzeit und damit schließlich die größenmäßige Auslegung des Reaktors.

Die Modelle beschreiben neben der Kinetik auch die Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile. Beides unterscheidet sich stark von Kohle zu Kohle, so dass die Verwendung von Literaturdaten nicht möglich ist; vielmehr müssen die den Brennstoff charakterisierenden Parameter für jeden Anwendungsfall neu bestimmt werden.

In Abb. 5 sieht man die CFD-Ergebnisse für die Temperatur und die wichtigsten Spezies CO, CO₂, H₂ und O₂ für die (bituminous) Utah-Kohle unter Verwen-

dung des CPD-Pyrolysemodells. Es zeigt sich die ausgeprägte Flammenstruktur am Brennermund mit den sehr hohen vergasungstypischen Temperaturen von über 2.800 K, die sich aufgrund der Verwendung von reinem Sauerstoff anstelle von Luft bei der Verbrennung einstellen. In dieser Flammenzone wird der unterstöchiometrisch eingebrachte Sauerstoff bei der Umsetzung der Flüchtigen verbraucht. Unterhalb der Flammenzone ist kein Sauerstoff vorhanden: Reduzierende Bedingungen bestimmen dort die Geschwindigkeit des Koksumsatzes. Diese Vergasungszone ist durch wesentlich geringere Konzentrationsgradienten in der Gasphase gekennzeichnet. Der langsame Anstieg der Konzentrationen der wichtigen Synthesegaskomponenten CO und H₂ in Richtung des Reaktorauslasses ist deutlich zu erkennen. Er ergibt sich einerseits als Konsequenz aus den langsamen Gasphasenreaktionen und andererseits durch die Freisetzung von CO bei den heterogenen Koksreaktionen.

Dies ist detailliert für alle Pyrolysemodelle in Abb. 6 entlang der Reaktorachse dargestellt, die experimentellen Daten sind als Symbole gezeigt. Es zeigen sich bei den Ergebnissen in der Flammenzone nur geringe Unterschiede zwischen den Modellen. Für die nachgeschaltete Vergasungszone sind die Ergebnisse sehr gut miteinander

vergleichbar; es sind nur geringe Differenzen zwischen ihnen zu erkennen. Die Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den numerisch ermittelten Daten ist insgesamt sehr gut. Nur die Ergebnisse für das H₂O weichen davon ab. Dies weist – aufgrund der nur indirekten Bestimmung der Elementaranalysebilanzen – auf eine erhebliche experimentelle Unsicherheit hin. In der Originalarbeit, auf der die Messungen beruhen, wird dies diskutiert [Brown et al., AIChE, 1988]. Abweichungen sind insbesondere in der Nähe der Flammenzone zu erkennen.

Insgesamt liegen aber die Unterschiede in der Größenordnung der normalen experimentellen Unsicherheit. Die berechneten Daten für alle anderen Spezies, die direkt über der Probenentnahmestelle im Reaktor gemessen wurden, stimmen, wie bereits oben erwähnt, sehr gut mit den experimentell ermittelten überein.

Die hier nicht aufgeführten Ergebnisse für die anderen drei Kohlen, Illinois #6, Wyoming und North-Dakota-Braunkohle, zeigen vergleichbare, ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen zwischen numerischen und experimentellen Daten. Sie bestätigen die prädiktiven Qualitäten des Simulationsmodells.

Details dazu sind in einer kürzlich veröffentlichten Publikation zu finden

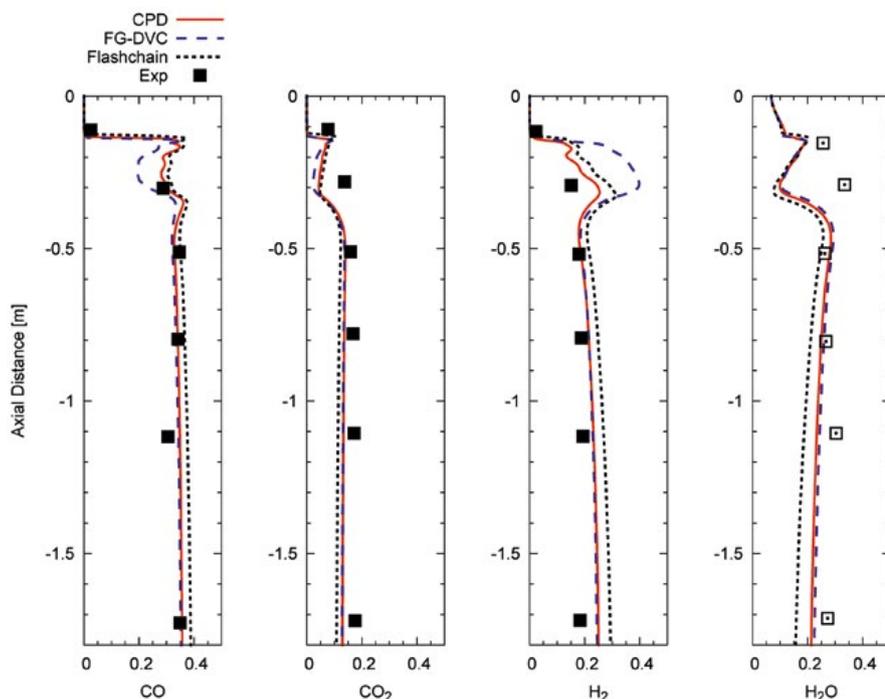


Abb. 6: Molenbrüche von CO, CO₂, H₂ und H₂O entlang der Reaktorachse. Vergleich der Simulationsdaten mit den experimentellen Daten für Utah-Kohle. Dargestellt sind die Simulationsergebnisse für alle drei verwendeten Pyrolysemodelle. Die experimentellen Ergebnisse für H₂O wurden aus einer Bilanz ermittelt und nicht direkt gemessen.

[Vascellari et al., Fuel, 2013]. Die am ZIK VIRTUHCON erhaltenen Ergebnisse sind auch im internationalen Vergleich die bisher besten Resultate für diesen Benchmark-Fall.

Zusammenfassung

Aufbauend auf den konkreten Stoffdaten und den von den beiden Nachwuchsforschungsgruppen Multiphasige Stoffsysteme und Grenzflächenphänomene

entwickelten Modellen wurde durch eine dritte Forschungsgruppe Reaktionsströmungssysteme ein Gesamtsimulationsmodell erstellt.

Die detaillierte Betrachtung des zu beherrschenden, komplexen Mechanismus der chemischen Reaktionen sichert dabei bereits gewonnene Erkenntnisse ab und ermöglicht die Untersuchung weiterer Prozesse, wie beispielsweise desjenigen der Zündung.

Vorgestellt wird die Simulation der Pyrolyse von vier unterschiedlichen Kohlen, die in einem Forschungsvergassungsreaktor getestet wurden. Die Simulationsergebnisse bestätigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten, wodurch die Praktikabilität des Gesamtmodells, das für jede Kohle jeweils nur in den die Brennstoffe charakterisierenden Parametern modifiziert wurde, demonstriert werden konnte.

Durch das Zusammenwirken der drei am ZIK VIRTUHCON beteiligten Nachwuchsforschungsgruppen ist es in Kooperation mit den beteiligten Initiativinstitutionen gelungen, ein erstes, mit seinen prädikativen Potenzen leistungsfähiges Simulationsmodell für die Kohlevergassung in Flugstromreaktoren zu entwickeln und zu validieren, ein Modell, das dieser Beitrag beschrieben hat.

Ressourceneffizienz am Beispiel multifunktionaler keramischer Filter für die Metallfiltration (SFB 920)

Undine Fischer, Marcus Emmel, Steffen Dudczig, Christos G. Aneziris

Filtration von Metallschmelzen¹

Knappe Ressourcen und die Notwendigkeit zur Senkung des Energiebedarfs fordern die Werkstoffforschung heraus, deutlich leistungsfähigere und dennoch material- und energieeffizientere Werkstoffe und Herstellungsverfahren zu finden. Die Frage nach der Funktionsfähigkeit eines metallischen Bauteils ist in der Technik oft mit dem Begriff der Festigkeit und der Zähigkeit des eingesetzten Werkstoffs verbunden. Beide Eigenschaften hängen in hohem Maße von dessen Reinheitsgrad und der Homo-

genität der Verteilung der chemischen Elemente ab.

Sicherheitsbauteile, dünn- oder dickwandige Gussteile oder geschmiedete Komponenten mit hohen Anforderungen an Festigkeit, Zähigkeit und Ermüdungsresistenz können derzeit aufgrund des herstellungsbedingten Anteils von Verunreinigungen nicht ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten. Häufig kommt es zu einer dramatischen Reduzierung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften, wie z. B. der Kerbschlagzähigkeit um bis zu 40 %, [1], [5], Abb. 1.

Mit steigenden Anforderungen an die Beanspruchbarkeit des Stahls gewinnt die Abscheidung von Einschlüssen entscheidend an Bedeutung. Hierzu kommen in den letzten Jahren vermehrt keramische Gießfilter zum Einsatz. Ihre

Hauptaufgaben sind, die Anzahl der nichtmetallischen Einschlüsse zu vermindern und die Strömung im Angussystem zu beruhigen, damit die Formfüllung im Formhohlraum möglichst laminar und ohne Turbulenzen abläuft. Die Verwendung von Schaumkeramiken als Filtermakrostrukturen ist eine wirksame Maßnahme zur Entfernung nichtmetallischer Einschlüsse aus dem Metallstrom und bewirkt deutliche Festigkeitssteigerungen. Darüber hinaus führt eine effiziente Reduzierung des Anteils solcher Einschlüsse zur drastischen Schonung von Ressourcen, indem zusätzliche mechanische Nachbearbeitungsschritte eingespart werden, Abb. 2. Im Endprodukt müssen anderenfalls Makroeinschlüsse, wie z. B. Pfannenschlacken, Ofenfutterpartikel oder Sand

¹ Kontakt: Sonderforschungsbereich 920, „Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration – ein Beitrag zu Zero Defect Materials“, Inst. für Keramik, Glas- und Baustofftechnik, Aneziris@ikgb.tu-freiberg.de
Undine.Fischer@ikgb.tu-freiberg.de

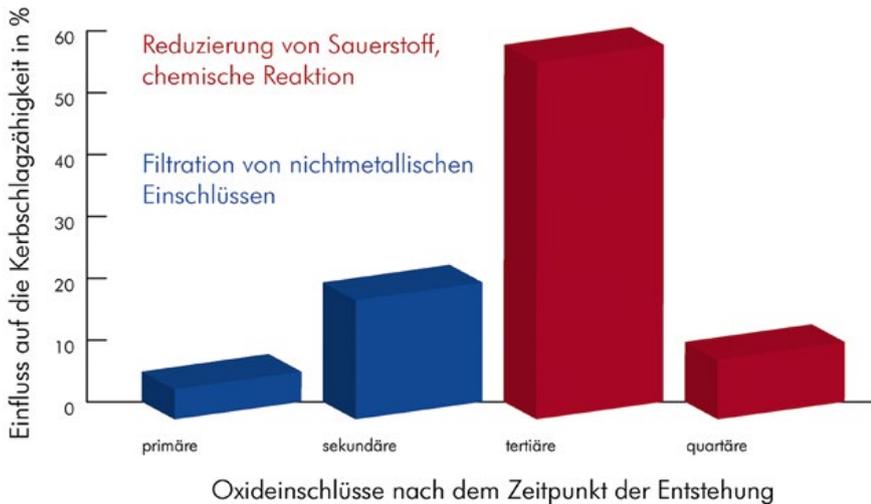


Abb. 1: Einfluss der Oxideinschlüsse auf die Kerbschlagzähigkeit von Stahl [1].; primäre und sekundäre Einschlüsse können mittels Filtration reduziert werden (aktive Filterwerkstoffe für noch höhere Filtrationseffizienz), bei den tertiären und quartären führt eine Verminderung des gelösten Sauerstoffs im Stahl zu deren Reduzierung (Einsatz von reaktiven Filterwerkstoffen), [5].

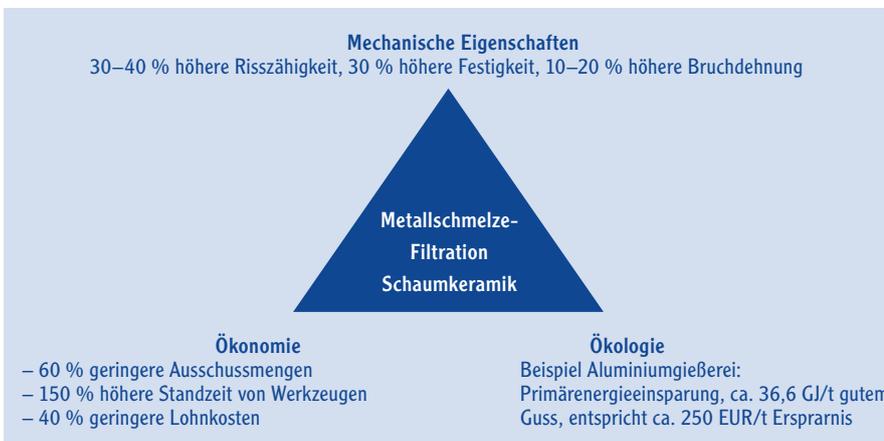


Abb. 2: Zu den erzielbaren Vorteilen einer Metallschmelzefiltration gehören verbesserte Qualität, geringere Ausschussraten und verringerte Energie-, Metall-, Form- und Lohnkosten, [6].

durch kostspieliges Ausbrennen und Schweißen oder Ausschleifen beseitigt werden. Wenn diese in der Gießerei nicht entdeckt und entfernt werden, zeigen sie sich möglicherweise erst am Ende einer aufwendigen Bearbeitung oder gar erst beim Endkunden, [6], Abb. 3.

Bei der Herstellung von Gussteilen aus Stahl gelangen zahlreiche unterschiedliche Verunreinigungen in die Stahlschmelze, die metallurgisch schwer oder gar nicht entfernt werden können. Genau hier setzt der Sonderforschungsbereich 920 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) an der TU Bergakademie Freiberg mit der Erforschung neuer Filterwerkstoffe und Filtersysteme zur Reinigung von Metallschmelzen an. In der Vergangenheit waren Filterwerkstoffe und -systeme meist passive und nichtfunktionalisierte Prozesselemente. Zukünftige multifunktionale Filterwerkstoffe und -systeme werden in der Lage

sein, Stahlschmelzen deutlich besser als bisher von Verunreinigungen zu befreien und sowohl die Homogenität des Werkstoffs als auch dessen Oberflächenqualität beträchtlich zu steigern.

Dieses Ziel soll mittels einer erheblichen Reduzierung der Anzahl von anorganischen, nichtmetallischen Einschlüssen in der Stahlmatrix durch den Einsatz intelligenter Filterwerkstoffe bzw. Filtersysteme erreicht werden. Mit einer funktionalisierten Filteroberfläche auf Basis aktiver keramischer Beschichtungen (mit ähnlicher Chemie wie die der Einschlüsse) und in Kombination mit maßgeschneiderten Druckverhältnissen in den Funktionshöhlräumen der Filter soll die Abscheidung der Einschlüsse an der Filteroberfläche erheblich verbessert werden, [7].

Einen weiteren Beitrag leisten reaktive Filteroberflächen, die mit den in den Schmelzen gelösten Gasen reagieren

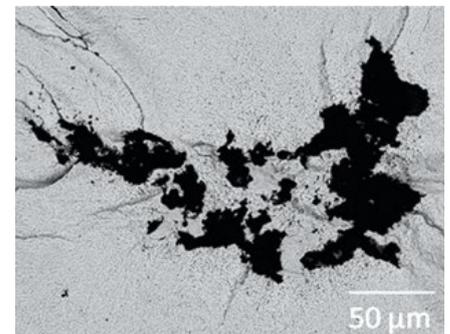
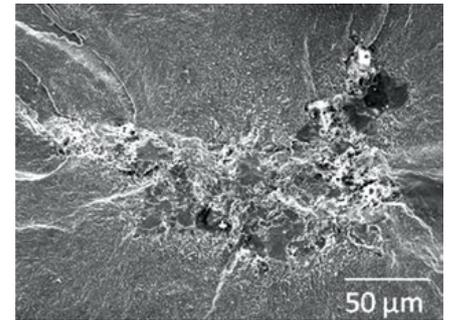
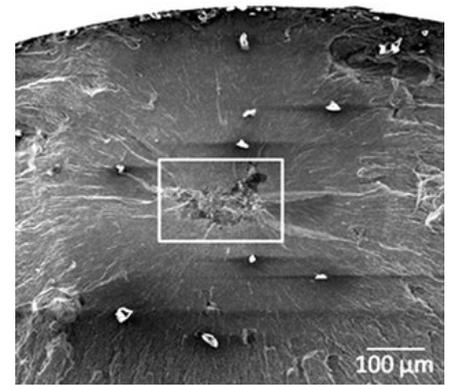


Abb. 3: Bruchfläche GS-42CrMo4, $\Delta\sigma/2 = 380$ MPa, $N_f = 1,8 \times 10^7$; oben: „Fish-Eye“-Fracture, darunter nichtmetallischer Einschluss vom Typ Al_2O_3 , [9]

und damit auch Gasverunreinigungen und Einschlüsse, die unterhalb der Liquidus-Temperatur der Stahlschmelzen generiert werden, erstmalig deutlich reduzieren, [8].

Filter für die Stahlschmelzefiltration

Etwa 70% der hergestellten Schaumkeramikfilter werden gegenwärtig für die Filtration von Metallschmelzen eingesetzt. In Europa wurden im Jahr 2002 ca. 2 Mio. für den Stahlguss bestimmte Filterprodukte ausgeliefert. Damit wird der Stahlgussmarkt zu einem Drittel in Europa abgedeckt [2]. Die jährliche Steigerungsrate dieser Auslieferungen liegt heutzutage bei über 5% und betrifft auch gepresste und extrudierte Filter mit ca. 400 Mio. Stück in Europa.

Die für die Abscheidung von Einschlüssen erforderlichen, meist schaumkeramischen Filter werden am Fuß des Eingusses, horizontal im Lauf oder -beim

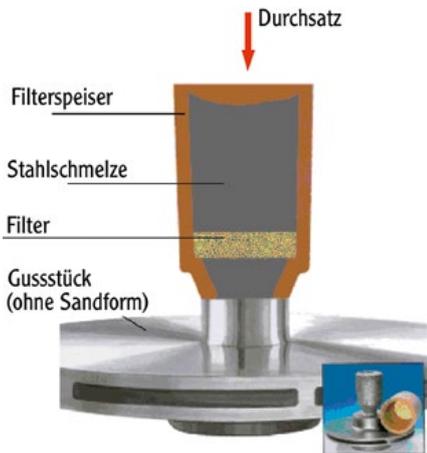
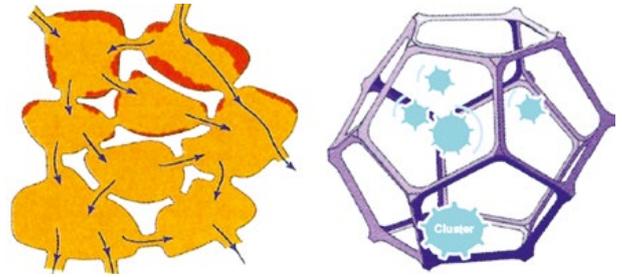


Abb. 4: Positionierung von keramischen Schaumkeramikfiltern in Filterspeisern für den Guss von Stahlgussbremsscheiben, Fa. Vesuvius

Direkteingussverfahren - innerhalb des Speisers eingesetzt, im Fein- und Maskenformguss auch im Eingusstrichter, *Abb. 4*. Die keramischen Filterwerkstoffe müssen höchsten Ansprüchen hinsichtlich ihrer chemischen, thermischen, mechanischen und thermomechanischen Stabilität – am Beispiel Stahlguss – bei einer Gießtemperatur von ca. 1.620 bis 1.650 °C genügen.

Die Schaumkeramikfilter sichern den höchsten Abscheidegrad für nichtmetallische Einschlüsse, insbesondere für Oxide und Sulfide. Begründet wird die hohe Filtrationswirkung mit dem günstigen Strömungsverlauf der Schmelze in den miteinander verbundenen Poren. Die Partikel lagern sich an den Filterporen ab, die näherungsweise die Gestalt von Pentagondodekaedern haben, *Abb. 5* rechts. Für die Intensität der Anlagerung des Einschlusses an der Filterwand sind dabei neben der Wechselwirkung von Teilchen und Schmelze auch die Interaktion von Filterwand und Schmelze sowie die zwischen Einschluss und Filterwand wirkenden Kräfte zu berücksichtigen. Nichtmetallische Einschlüsse werden aufgrund der hohen Oberflächenspannung der Stahlschmelze abgestoßen, sobald es zur Berührung mit dem keramischen Filtermaterial kommt. Entscheidend ist dabei der Kontaktwinkel, der das Benetzungsverhalten in den Systemen Metallschmelze/Einschluss bzw. Metallschmelze/Filterwand beschreibt. Trifft ein Einschluss auf die Filteroberfläche, kann sich die Schmelze aus dem Spalt zwischen Einschluss- und Filteroberfläche zurückziehen. Zusätzlich wirken attraktive Kräfte zwischen Filterwand und Einschluss. Dadurch wird

Abb. 5: Filtersysteme mit vereinten Filter-Funktionen: (rechts) rotierende Einzelschlüsse führen zu Cluster-Einschlüssen, die die Filterwand (links) benetzen und an ihr haften bleiben (in der Abbildung rot dargestellt), [5]



die Haftung des Teilchens an der Wand ermöglicht. Teilchen, die an der Filteroberfläche zusammentreffen, können sich zu Clustern zusammenlagern, die fest am Filter haften und als Strömungshindernisse wirken.

Bedingung für die genannten Vorgänge ist eine schlechte Benetzbarkeit sowohl der Einschlüsse als auch der Filterwand durch die Metallschmelze. Mit Hilfe neuartiger, aktiver keramischer Filterwerkstoffe auf der Basis von kohlenstoffgebundenem Aluminiumoxid soll die Filtrationseffizienz gegenüber oxidhaltigen Einschlüssen bis zur Größe von 100 µm in Stahlschmelzen gesteigert werden.

Neuartige kohlenstoffgebundene Filterwerkstoffe

Schaumkeramikfilter auf der Basis von kohlenstoffgebundenem Aluminiumoxid (Al₂O₃-C) werden zunehmend für die Stahlschmelzefiltration eingesetzt. Kohlenstoffgebundenes Aluminiumoxid garantiert eine hohe mechanische Festigkeit, Kriechbeständigkeit sowie geringe Korrosion des Filterbauteils bei der Hochtemperaturanwendung. Der Kohlenstoffanteil bewirkt u. a. eine Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit des Bauteils. Aufgrund der sehr geringen Gusszeitintervalle (2 bis 30 s) und der schwachen Benetzung der Filterwand durch die Stahlschmelze gibt es keine negativen chemischen Wechselwirkungen zwischen dem Kohlenstoff im Filter und der Stahlschmelze. Ein großes Potenzial bezüglich Materialeigenschaften und Filtereffizienz versprechen Filtermaterialien, die ohne Harzbindung, nur mit synthetischem Steinkohleteerpech (z. B. Carbores® P, Fa. Rütgers), hergestellt worden sind.

Der Einsatz von Steinkohleteerpechen als Kohlenstoffträger und Bindemittel in feuerfesten, geformten Erzeugnissen für die Hochtemperaturanwendung ist gut bekannt. Die eigentliche Binderwirkung im Werkstoffgefüge des Erzeugnisses wird erst nach einem

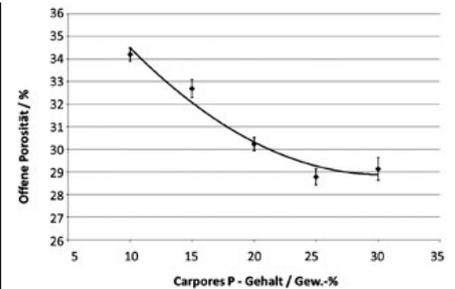


Abb. 6: Offene Porosität kohlenstoffgebundener Filterwerkstoffe auf Aluminiumoxid-Basis in Abhängigkeit vom Carbores® P-Gehalt, [4]

Verkokungsprozess unter reduzierenden Bedingungen bei 800 bis 1.000 °C erreicht. Das Verfahren zur Herstellung von Filtern für die Metallschmelzefiltration beruht auf einer Replikatechnik, bei der die stofflichen Bestandteile als wässriger Schlicker in Schichten auf einen PU-Schaum aufgebracht werden. Nach einem speziellen Trocknungs- und Verkokungsprozess erhalten die so hergestellten Filterwerkstoffe schließlich ihre Endeneigenschaften. [3]

Untersuchungen an Filterwerkstoffen in der Ausführung 10 ppi (pores per inch) auf der Basis von kohlenstoffgebundenem Aluminiumoxid nach Emmel et. al. zeigen, dass ein zunehmender Gehalt an Carbores® P eine Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Werkstoffgefüge hervorruft. Die damit in Zusammenhang stehende Reduzierung der Porosität der Filterstege in *Abb. 6* wird auf die Bildung flüssiger Phasen des Carbores® P ab 238 °C und die Infiltration des offenporösen Filtersteggefüges zurückgeführt. Die Verringerung der offenen Porosität der Filterstege ist letztendlich die Ursache für einen Anstieg der Festigkeit des Filterwerkstoffs (*Abb. 7*). [4]

Praktische Bedeutung erlangt diese Erkenntnis bei der Herstellung größerer Filterformate mit höheren Gießkapazitäten, die bei ihrem Einsatz eine vergleichsweise wesentlich höhere Festigkeit erfordern. Nach Aneziris et. al. konnte durch Einsatz von Nano-Partikeln (CNT – Carbon-Nanotubes, Alumina NS – Alumina-Nanosheets) im Sprüh-

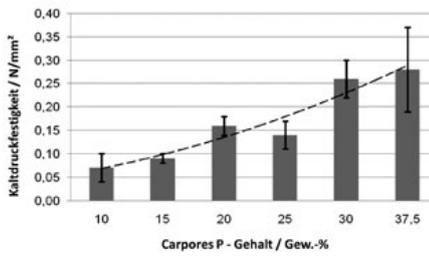


Abb. 7: Kaltdruckfestigkeit kohlenstoffgebundener Filterwerkstoffe auf Aluminiumoxid-Basis in Abhängigkeit vom Carbores® P-Gehalt, [4]

schlicker bei einer weiteren Beschichtung auf der Filteroberfläche die Festigkeit von Carbores-Filtern um ca. 40 % gesteigert werden. Dieser Effekt lässt sich u. a. auf eine neugebildete Al_3CON -Phase in der Kohlenstoffmatrix zurückführen. [4]

Die Funktionalisierung der Filteroberfläche zur verbesserten Abscheidung von Einschlüssen aus der Stahlschmelze wird mit einer auf reinem Aluminiumoxid, Mullit oder Spinell basierenden (kohlenstofffreien) aktiven Schicht durch Sprühauftrag auf den bereits verkochten Carbores-Filter gewährleistet (Abb. 8). Beim Abguss der Stahlschmelze über funktionalisierte Filter bedingt die aktive Schicht das Anhaften größerer Einschlüsse mit ähnlicher Chemie wie die Beschichtung [10]. Abb. 9 zeigt das Anhaften von großen exogenen und feinen endogenen Al_2O_3 -Partikeln auf der Oberfläche eines neuartigen, aktiven kohlenstoffgebundenen Filters. Außer der chemischen Wechselwirkung kann auch eine notwendige Rauigkeit als Ursache für das Abscheiden bzw. die Anlagerung dieser nichtmetallischen Einschlüsse angesehen werden [11].

Einen weiteren Ansatz zur Steigerung der Filtrationseffizienz bietet die Erzeugung reaktiver Funktionshöhlräume, wobei die Beschichtung des Filtersubstrats aus kohlenstoffgebundenem Al_2O_3 mit kohlenstoffgebundenem MgO erfolgt. Hier bewirkt die Reaktion vom gasförmigen Magnesium mit dem in der Schmelze gelösten Sauerstoff die Abscheidung einer sekundären MgO-Schicht auf der Filteroberfläche [12]. An dieser kommt es zur Anhaftung von nichtmetallischen Einschlüssen in Form von Agglomeraten. Das in Abb. 10 gezeigte Agglomerat besteht aus feinsten zusammengesinterten exogenen und endogenen Al_2O_3 -Partikeln; es bildet sich während des Filtrationsvorgangs in der Stahlschmelze.

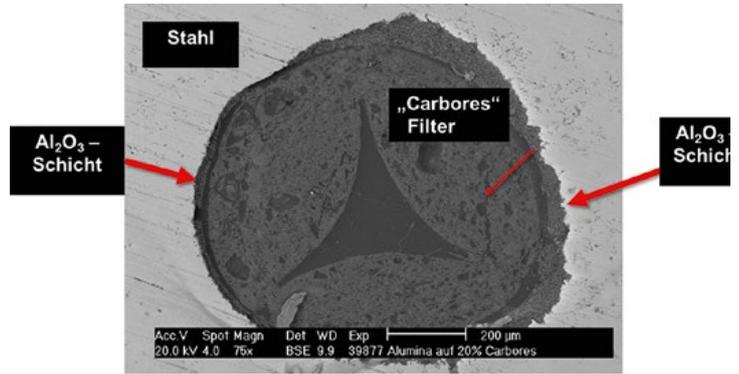


Abb. 8: REM-Aufnahme eines kohlenstoffgebundenen Filtersteigs mit 20 Masse-% Carbores® P (Carbores-Filter) mit einer auf reinem Aluminiumoxid basierenden aktiven Schicht nach dem „Small Impingement“-Test, 5 kg Stahlschmelze (Werkstoff 42CrMo4) bei 1.670 °C, [4]

Abb. 9: Anlagerung großer und kleiner Al_2O_3 -Partikel als Agglomerat an der Oberfläche eines kohlenstoffgebundenen keramischen Filters mit aktiven Funktionshöhlräumen

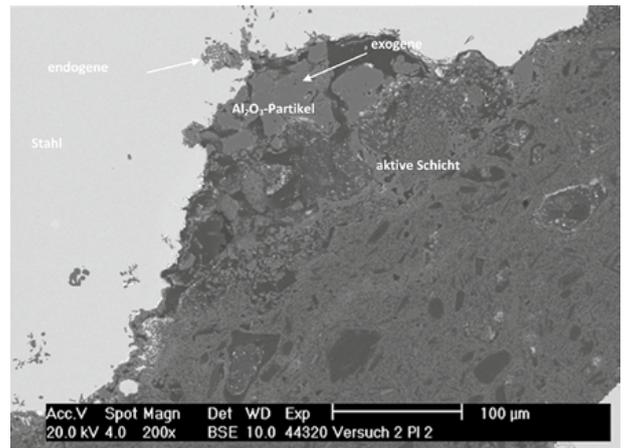


Abb. 10: Anlagerung eines Al_2O_3 -Agglomerats an der Oberfläche eines kohlenstoffgebundenen keramischen Filters mit reaktiven Funktionshöhlräumen

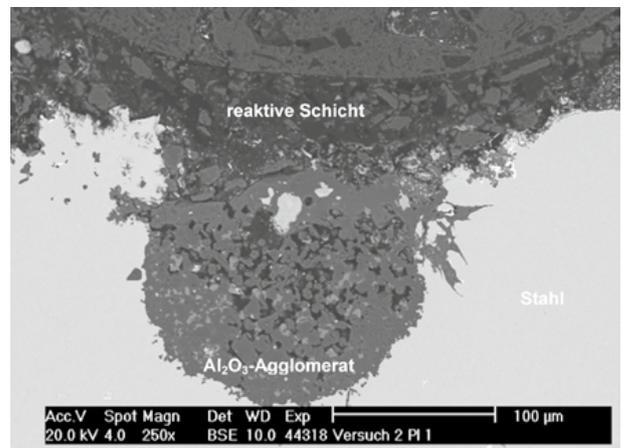


Abb. 11: „Small Impingement“-Test von Carbores-Filter mit 5 kg Stahlschmelze (Werkstoff 42CrMo4) bei 1.670 °C, [5]



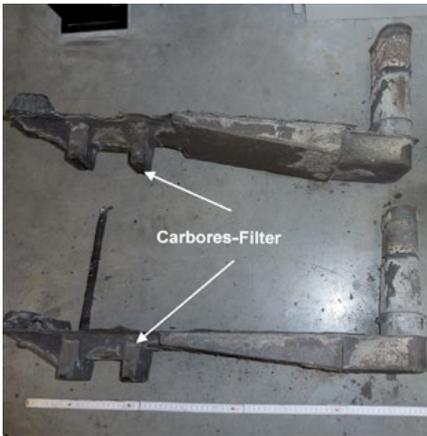


Abb. 12: Gussplatten aus Stahl nach dem Abguss mit Carbores-Filtern in der Firma Edelstahlwerke Schmees GmbH in Pirna

Als erster Hinweis auf die industrielle Anwendbarkeit der neuartigen Filterwerkstoffe dient der sogenannte *Small Impingement Test* gem. Abb. 11. Hier werden die neuen Filterwerkstoffe mit definierten Abmessungen mit 5 kg Stahlschmelze (Werkstoff 42CrMo4) in Luft bei 1.670 °C und einer Fallhöhe von ca. 50 cm belastet. Als Auswahlkriterium für die Funktionstüchtigkeit des getesteten Filters gilt die Versagensneigung der Filterstruktur durch Risse bzw. Bruch.

Nach erfolgreich bestandem Small Impingement Test konnten die ersten Carbores-Filter unter industriellen Bedingungen für den Formguss mit ca. 100 kg Stahlschmelze getestet werden. Abb. 12 zeigt industriell hergestellte Gussstücke (Platte 200 × 300 × 20–40 mm) mit Anguss und eingesetztem Carbores-Filter nach dem Stahlgieß- und Abkühlungsprozess. Untersuchungen der Gussstücke anhand von metallographischen Schliffbildern der Metallmatrix zeigen, dass der Anteil von nichtmetallischen Einschlüssen bis zu einer Größe von 100 µm verringert wurde [13]. Beim Vergleich der eingesetzten neuartigen keramischen Filter mit unterschiedlicher Funktionalisierung der Filteroberfläche wurde nach Emmel et. al. festgestellt, dass die Filtrationseffizienz von der Chemie der nichtmetallischen Einschlüsse und dem verwendeten Filtermaterial abhängt [14]. Damit ist eine signifikante Verbesserung der Filtrationseffizienz in eisenhaltigen Schmelzen beim Einsatz der neuen Filtersysteme in greifbare Nähe gerückt.

Forschungsstrategie für die Zukunft

Grundsätzlich werden bei der Erforschung von multifunktionalen kerami-

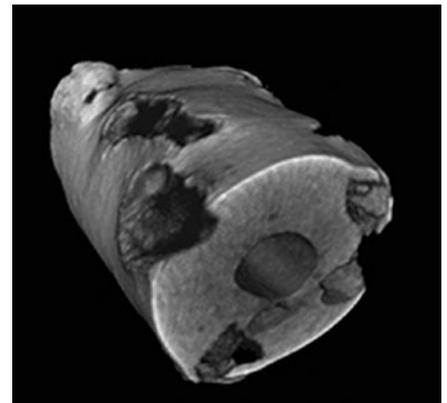
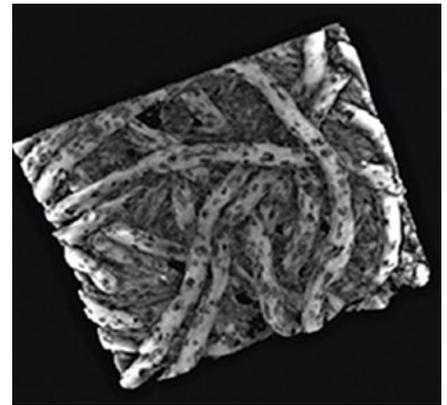
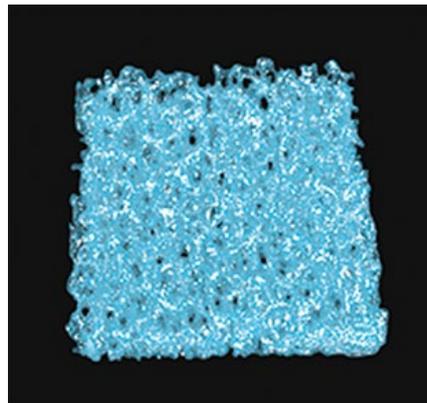
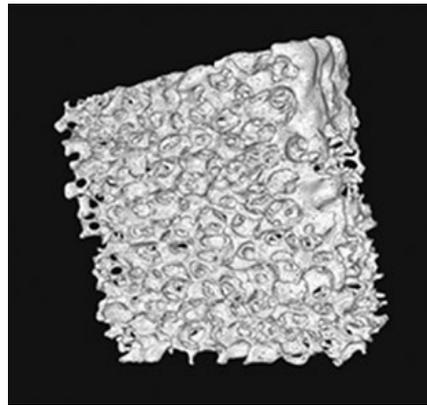


Abb. 13: Schaumkeramikstrukturen (linke Bilder, 10 pores per inch) und Hohlspaghettistrukturen (rechte Bilder, 1 mm Wandstärke, 1 mm Innendurchmesser) als Filterkeramiken, CT-Aufnahmen, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik, [5]

schen Filtern zwei Strategien verfolgt: Filtersysteme mit vereinten Filterfunktionen für den Formguss (Agglomeration von feinen Partikeln in den Funktionshöhlräumen und Abscheidung durch Benetzung und Haftung an der aktiven Filterwand des Hohlräume) oder Filtersysteme mit geteilten Filterfunktionen (Agglomeration und Abscheidung der Partikel finden an unterschiedlichen Stellen statt) für kontinuierliche Gießprozesse, wie z. B. beim Strangguss.

Dem Filterdesign dienen die funktionalisierten a) Schaumkeramikmakrostrukturen, b) Hohlspaghettistrukturen mit Makroporen, c) poröse Keramikpapierstrukturen, d) Kugelbett-Kombinationen oder e) kombinierte Filtersysteme für die unterschiedlichen Metallschmelzen, Einschlüsse und Gießverfahren, Abb. 13. Die stromunterstützte Filtration, Filter mit höheren Filtrationskapazitäten (Durchmesser größer 200 mm), Filtersysteme für den kontinuierlichen Strangguss bis hin zum filterunterstützten Blockguss für geschmiedete Sicherheitsbauteile sind wegweisend für den Standort Deutschland im internationalen Wettbewerb. [5]

Zur Erreichung dieser Ziele werden modernste Methoden für die theoretische

und experimentelle Auslegung der aktiven und reaktiven Filterwerkstoffe sowie für die Erfassung der Filtrationseffizienz am Gussbauteil eingesetzt.

Danksagung

Der Sonderforschungsbereich 920 wird dankenswerterweise aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG von Juli 2011 bis Juni 2015 finanziert. Ein weiterer Dank gilt der Firma Edelstahlwerke Schmees GmbH in Pirna für die Unterstützung bei der Durchführung der Gießversuche unter industriellen Bedingungen.

Literaturverzeichnis

- 1 Ovtchinnikov, S.: Kontrollierte Erstarrung und Einschlussbildung bei der Desoxidation von hochreinen Stahlschmelzen. Freiberg, TU Bergakademie, Dissertation, 2002
- 2 Jaunich, H., Pech, B., Aneziris, C.G. (2003): Vorsprung durch Innovation bei der Entwicklung von Speisern und Filtern für die Gießertechnik, cfi/Ber. DKG 80 No.5, D11-D15
- 3 Emmel, M.; Aneziris, C.G. (2012): Development of novel carbon bonded filter compositions for advanced steel melt filtration. Ceramic International. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.03.022
- 4 Aneziris, C.G.; Emmel, M.; Stolle, A. (2012): Multifunctional Carbon Bonded Filters for Metal Melt Filtration, in Advances in Bioceramics and Porous Ceramics V (eds R. Narayan, P. Colombo, M. Halbig and S. Mathur), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. Published Online: 3 DEC 2012, Published Print:

19 NOV 2012 Print ISBN: 9781118205969,
Online ISBN: 9781118217504. DOI: 10.1002/
9781118217504.ch16

- 5 Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration – ein Beitrag zu Zero Defect Materials, Finanzierungsantrag des Sonderforschungsbereichs 920 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Sprecher C.G. Aneziris, 10.10.2010
- 6 Apsley, S.D.: Energiesparen mit SIVEX FC Filtern, Foundry Practice, Ausgabe 228, Auszug aus einer Fallstudie (Case Study No. 228) vom Energy Efficiency Enquireis Bureau, ETSU, Harwell, Didcot, Oxfordshire OX11 0RA UK, Foseco, 1996.
- 7 Aneziris, C.G.; Emmel, M.; Dudczig, S: Aktive Filter für die Metallschmelzefiltration, Deutsche Patentanmeldung 10 2011 109 681.0, Offenlegung: 14.02.2013
- 8 Aneziris, C.G.; Emmel, M.; Dudczig, S: Reaktive Filter für die Metallschmelzefiltration, Deutsche Patentanmeldung 10 2011 109 684.5, Offenlegung: 14.02.2013
- 9 Krewerth, D.; Weidner, A.; Biermann, H.; Emmel, M.; Aneziris, C. G.; Stolle, A.; Eigenfeld, K. (2012): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Gefügeinhomogenitäten auf das VHCF-Ermüdungsverhalten des Stahlgusses GS 42CrMo4. Tagungsband zum 15. Werkstofftechnischen Kolloquium WTK, 20.-21. September 2012 in Chemnitz. Band 47, S. 411-421, ISBN 978-3-00-039358-7
- 10 Emmel, M., Aneziris, C. G. (2013): Functionalization of carbon-bonded alumina filters through the applications of active oxide coatings for the steel melt filtration. Journal of Materials Research. DOI 10.1557/jmr.2013.56
- 11 Aneziris, C. G., Schröder, C., Emmel, M., Schmidt, G., Heller, H.-P., Berek, H. (2013): „In Situ“ Observation of Collision between Exogenous and Endogenous Inclusions on Steel Melts for Active Steel Filtration. Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 44B, Iss. 2, April 2013. DOI: 110.1007/s11663-013-9828-6
- 12 Aneziris, C. G., Dudczig, C., Emmel, M., Berek, H., Schmidt, G. (2012): Reactive Filters for Steel Melt Filtration. Advanced Engineering Materials, Vol. 15, Iss. 1-2, pp. 46-59, DOI: 10.1002/adem.201200199
- 13 Henschel, S., Krewerth, D., Ballani, F., Weidner, A., Krüger, L., Biermann, H., Emmel, M., Aneziris, C.G. (2013): Effect of filter coating on the quasi-static and cyclic mechanical properties of a G42CrMo4 casting. Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.201300125
- 14 Emmel, M., Aneziris, C.G., Schmidt, G., Krewerth, D., Biermann, H. (2013): Influence of the chemistry of ceramic foam filters on the filtration of alumina based non-metallic inclusions. Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.201300118

Ressourceneffizienz im Feuerfestbereich

Nora Brachhold, Steffen Dudczig, Vasileios Rongos, Christos G. Aneziris

Einleitung

Keramikmaterialien für Hochtemperaturanwendungen sind aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Zahlreiche Werkstoffe, wie Glas, Metalle und Zement sind ohne sie nicht herstellbar, da Hochtemperaturkeramiken für die Auskleidung von Prozessräumen benötigt werden. Analoges gilt für Energiewandlungsprozesse. Feuerfestes Material kleidet z. B. die Brennkammern von Gasturbinen aus. Die Anforderungen an die Werkstoffe sind vielfältig. Die Belastungstemperaturen liegen – je nach Anwendung – direkt im Prozessraum oder im Wärmedämmbereich zwischen 2.000 °C und 600 °C. Zusätzlich sind die Feuerfestmaterialien chemischen, mechanischen oder abrasiven Einflüssen und Thermoschockbelastungen ausgesetzt. [1]

Der wachsende Bedarf unterstreicht die hohe Bedeutung dieser speziellen Materialien. So ist ihr weltweiter Verbrauch zwischen 2002 und 2011 von 23 Mio. auf 39 Mio. t stetig angestiegen und wächst weiter [2-3]. Dieser Trend verlangt von der Feuerfestindustrie erhebliche Anstrengungen in Richtung einer effizienten Nutzung von Rohstoffen und anderweitigen Ressourcen. Einerseits sollen die Eigenschaften, insbesondere die Lebensdauer der Keramiken, in der jeweiligen Anwendung stetig verbessert bzw. gesteigert werden. Andererseits wird angestrebt, umweltschädliche Emissionen aus dem Produktionsprozess zu senken [1]. Dabei rückt vor allem der Kohlenstoffgehalt des Feuerfestmaterials in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit. Dieser sorgt für ein ausgezeichnetes Thermoschockverhalten des Materials, was insbesondere für Prozesse, in denen plötzlich heftige Temperaturänderungen auftreten, notwendig ist, wie z. B. beim Umfüllen von flüssigem Stahl. Jedoch gehen hohe Kohlenstoffanteile mit starkem Kohlenstoffdioxidausstoß – meist während der Materialherstellung – einher. Innovationen im Bereich der kohlenstoffgebundenen Feuerfestwerkstoffe würden sich also direkt in einer Reduzierung der Emission klimarelevanter Gase niederschlagen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft trägt der Bedeutung dieses Forschungs-

felds Rechnung, indem sie im Jahr 2009 das Schwerpunktprogramm 1418 „Feuerfestinitiative zur Reduzierung von Emissionen – Fire“ auflegte und dieses 2012 für weitere drei Jahre verlängerte – als Rahmen für die interdisziplinäre Forschung über eine neue Generation kohlenstoffarmer bzw. kohlenstofffreier Feuerfestwerkstoffe, insbesondere für die Stahlindustrie. Sie soll zu einer deutlichen Senkung des Kohlenstoffdioxidausstoßes dieser Industrie beitragen. Das von der TU Freiberg aus koordinierte Programm vereint Wissenschaftler aus elf deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen. Es umfasst die Bereiche Materialentwicklung, innovative Formgebungsverfahren, Modellierung/Simulation, Prüftechnik und Erarbeitung einer Forschungsroadmap für das gesamte Gebiet der Feuerfestkeramik. Im Folgenden werden Ergebnisse der am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik im Rahmen des Schwerpunktprogramms durchgeführten Arbeiten vorgestellt.

Einsatz von Nanopartikeln zur Reduzierung des Kohlenstoffgehalts in kohlenstoffgebundenen Feuerfesterzeugnissen

Das Teilprojekt untersuchte den Einfluss nanoskaliger Additive auf die Bindematrix kohlenstoffgebundener Feuerfestwerkstoffe, um die Ankopplung des oxidischen Körnungsmaterials an die Bindematrix zu optimieren. Dadurch sollten die Materialeigenschaften bei gleichzeitiger Reduzierung des Kohlenstoffanteils verbessert werden.

Zum kombinierten Einsatz kamen nanoskalige Pulver von Aluminiumoxid-Plättchen (α -Al₂O₃, AS) sowie Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT), [1-5]. Ihre Wirkung war anhand von Al₂O₃-C-Feuerfesterzeugnissen darzustellen.

Die Zusammensetzung der neu entwickelten Materialien basiert auf einem bisher maßgebenden industriellen Standard, der Korund und Grafit als Hauptbestandteile aufweist und mit einem Phenol-Novolak-Harz gebunden wird (Referenz 1) (Tab. 1). Die neu entwickelten Materialien enthalten einen um ein Drittel niedrigeren Anteil an Grafit und nanoskaligen Zusätzen von Kohlenstoff-

Tab. 1: Untersuchte Al₂O₃-C-Zusammensetzungen

Rohstoffe	Zusammensetzung (Gew.-%)		
	Referenz I	Referenz II	TN-AS
Korund	59,0	68,0	
Graphit	30,0	20,0	
Novolak	6,0	6,0	
Silizium	6,0	6,0	
Summe	100,0	100,0	
Alumina-Plättchen (AS)			0,1
CNT (TN)			0,3

nanoröhrchen und Aluminaplättchen. Zum Vergleich wurde ein zweites Referenzmaterial (Referenz 2) hergestellt, dessen Rezeptur ebenfalls den verringerten Graphit-Anteil, jedoch keine nanoskaligen Zusätze enthält. Zur Probenherstellung wurden die Komponenten in einem Zwangsmischer gemischt, anschließend uniaxial bei 100 MPa verpresst, gehärtet und schließlich bei 1.000 °C unter Sauerstoffausschluss verkocht. [8]

Die Proben wurden hinsichtlich ihrer Kalt-, ihrer Heißbiegefestigkeit sowie ihrer Temperaturwechselbeständigkeit charakterisiert. Die Daten in Tab. 2 zeigen, dass sich die Materialeigenschaften von Referenz 2 im Vergleich zu Referenz 1 durch die Herabsetzung des Graphitanteils zunächst verschlechtert hatten. Die Zugabe der nanoskaligen Additive wirkt diesem Effekt aber entgegen. Insbesondere die Hochtemperatureigenschaften verbessern sich dann wieder deutlich und übertreffen die Kennwerte von Referenz 1. Hervorzuheben ist der geringe Festigkeitsverlust nach der Thermoschockbelastung. [7-8]

Als Ursache für das vorteilhafte Materialverhalten werden zum einen in situ gebildete Fasern gesehen, die sich im Vergleich zu den Referenzproben in Länge, Verteilung, Menge und Kristallinität unterscheiden. Mittels Rückstreuungselektronenbeugung (EBSD) wurde im Material mit Zusatz nanoskaliger Additive aber auch die Bildung der Phase Al₃CON nachgewiesen. Sie wird für eine bessere Ankopplung des Hauptoxids an die Kohlenstoffmatrix verantwortlich gemacht, die die mechanischen Eigenschaften des Materials positiv beeinflusst. [8]

Bei den in der Stahlindustrie angewendeten Al₂O₃-C-Feuerfestwerkstoffen, z. B. als Bauteil in Anlagen für den kontinuierlichen Stahlstrangguss, erfolgen eine Verkockung der Erzeugnisse und ihre Vorwärmung vor dem Einsatz bei 1.000 °C. Die hier gezeigten Ergebnisse sind damit von hoher Bedeutung für die Praxis. Die Zugabe nanoskaliger Additi-

Tab. 2: Eigenschaften der Al₂O₃-C-Materialien nach einer Verkockung bei 1.000 °C (KBF – Kaltbiegefestigkeit, HBF – Heißbiegefestigkeit bei 1.400 °C, KBFTS – Restkaltbiegefestigkeit nach 5 Thermoschocks)

Zusammensetzungen	Eigenschaften			
	KBF (MPa)	HBF (MPa)	KBFTS (MPa)	Festigkeitsverlust (%)
Referenz I	15,9 ± 0,9	15,1 ± 0,8	11,4 ± 1,1	28,3
Referenz II	12,6 ± 0,7	12,3 ± 0,7	10,0 ± 0,6	20,6
TN-AS	12,9 ± 1,9	16,6 ± 0,1	12,8 ± 0,5	0,8

ve reduziert also den Kohlenstoffgehalt des Materials bei verbesserten thermomechanischen Eigenschaften und bewirkt damit eine Senkung klimaschädlicher Emissionen.

Mikrorissstabilität und Temperaturwechselbeständigkeit Al₂O₃-reicher Werkstoffe mit ZrO₂-, TiO₂- und/oder SiO₂-Dotierungen für feuerfeste Anwendungen

Die Verbesserung der Temperaturwechselbeständigkeit von Aluminiumoxidkeramiken durch Dotierung basiert darauf, dass eine solche Zweitphase in das Material eingebracht wird, die sich bei thermischer Belastung unter Volumenänderung in ihre Ausgangsstoffe zersetzt. Die resultierende Volumenänderung ermöglicht den Aufbau von Druckspannungen oder die Ausbildung eines Mikrorissgefüges, wodurch die durch thermische Belastung verursachten Zugspannungen kompensiert oder bereits initiierte Risse aufgehalten werden können. Wenn diese Zweitphase durch erneute Temperaturbehandlung immer wieder gebildet werden kann, besitzt das Material selbstregenerative Eigenschaften und kann für Anwendungen mit zyklischen Materialbelastungen eingesetzt werden.

Eine für die Dotierung geeignete Verbindung ist Al₂TiO₅. Sie zerfällt bei Abkühlung im Bereich zwischen 1.300 und 800 °C in Al₂O₃ und TiO₂ und kann bei erneutem Aufheizen wiedergebildet werden. Die Zersetzung und die anschließende Neubildung sind mit einer Materialvolumenabnahme bzw. -zunahme um ca. 11 % verbunden. Außerdem hat Al₂TiO₅ aufgrund seiner Kristallstruktur hervorragende Thermoschockeigenschaften. [9-11]

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen wurde im Rahmen des Projekts eine Aluminiumoxidkeramik mit TiO₂- und ZrO₂-Dotierungen hergestellt (kurz AZT-Keramik), mit dem Ziel, durch eine Hochtemperaturbehandlung in situ geeignete Zweitphasen (z. B. Al₂TiO₅ und ZrTiO₄) einzubringen.

Die Proben wurden per Schlickerguss hergestellt, wofür zunächst ein keramischer Schlicker hergestellt wurde, der die Oxidkomponenten enthielt. Sie wurden bei 1.650 °C gebrannt und anschließend einer wiederholten Thermoschockbelastung bei 950 und bei 1200 °C ausgesetzt. Die Abschreckversuche bei 950 °C führten zu keiner Verbesserung der Materialfestigkeit im Anschluss an die Temperaturbelastung. Nach fünf Thermoschocks war sie sogar um 15 % gegenüber dem Ausgangszustand abgesunken. Die bei 1.200 °C belasteten Proben zeigten dagegen nach der Temperaturbelastung eine deutliche Verbesserung der Restfestigkeit. So steigt diese nach dem 1. Thermoschock um 90 % gegenüber dem Ausgangszustand an und liegt nach dem 5. Thermoschock noch immer um 60 % über dem Ausgangsniveau. Durch eine erneute thermische Behandlung bei 1.400 °C kann ein Teil des Al₂TiO₅ wiedergebildet werden, sodass bei erneuter Thermoschockuntersuchung die Restfestigkeit wieder gesteigert werden kann. [12]

Untersuchungen mittels EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) und EBSD lassen im Gefüge die anvisierten Phasenumwandlungen erkennen. Abb. 1a zeigt das Gefüge nach Sinterung bei 1.650 °C. Al₂O₃ wurde als Hauptphase mit ZrO₂ und Al₂TiO₅ an den Korngrenzen identifiziert. In Abb. 1b ist das Gefüge nach einmaliger Thermoschockbelastung gezeigt. TiO₂ ist als zusätzliche Phase vorhanden, deren Entstehung auf den beschriebenen Zersetzungsmechanismus zurückgeführt wird. [12]

Die im Labormaßstab gezeigten sehr guten Thermoschockeigenschaften wurden unter realitätsnahen Bedingungen geprüft. Dazu steht im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1418 an der TU Freiberg ein Stahlgussimulator zur Verfügung, der ca. 100 kg Stahl induktiv unter einer kontrollierbaren Schutzatmosphäre schmelzen kann. Die Stahlschmelze kann dann in ein Verteilersystem mit Mehrfachdüsen und -kokillen umgefüllt und hieran das zu

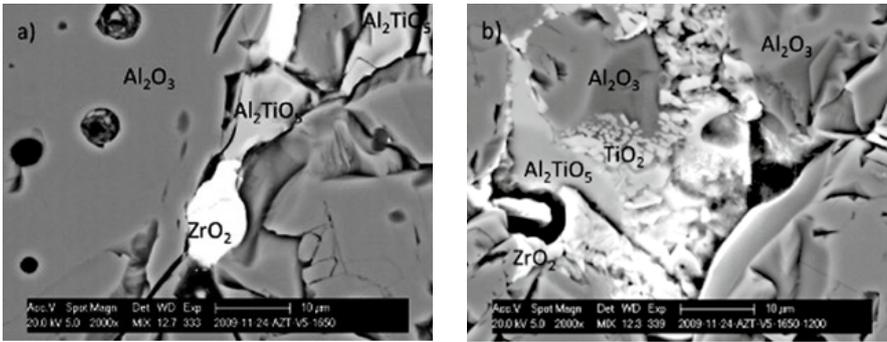


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der AZT-Keramik; a) nach Sinterung bei 1650 °C, b) nach einmal Abschreckung von 1200 °C [12]



Abbildung 2: Stahlgussimulator mit ausgefahrener Schmelzeinheit und ausgefahrenen Kokillen (links), Blick in den Stahlgussimulator beim Umgießen der Schmelze in das Verteilergefäß (rechts)



Abbildung 3: AZT-Testdüsen vor (links) und nach (rechts) Beaufschlagung mit Stahlschmelze [13]

prüfende Material mit Hilfe eines Adapters angebracht werden (Abb. 2). Die von uns entwickelte AZT-Keramik wurde als Material für Düsen im Stahlgussimulator getestet. Die Bauteile wurden auf 1.000 °C vorgeheizt und mit einer ca. 1.600 °C heißen Stahlschmelze belastet. Die eingesetzten Düsen haben der Belastung standgehalten (Abb. 3). Computertomografische Untersuchungen ergaben, dass entsprechend der Auflösungsgrenze des Geräts keine Schädigungseffekte im Größenbereich oberhalb von 35 µm nachweisbar waren [13]. Dies belegt, dass ein vielversprechendes kohlenstoff-

freies Feuerfestmaterial für Anwendungen im Bereich der Stahlmetallurgie entwickelt worden ist.

Ausblick

Diese ersten Ergebnisse haben gezeigt, dass eine Reduzierung des Kohlenstoffgehalts in Feuerfestmaterialien für stahlmetallurgische Anwendungen ohne eine Verschlechterung der Eigenschaften möglich ist. Die Versuche sollen gezielt weitergeführt und der Kohlenstoffgehalt weiter gesenkt werden. Unsere Untersuchungen an weitgehend kohlenstofffreien feuerfesten Werkstoffen auf

der Basis von Aluminiumoxid belegen, dass die sehr guten Thermoschock-eigenschaften des Materials mit der Fähigkeit zur Selbstheilung aufwarten. Diese Ansatzpunkte sind vielversprechend in Bezug auf die Entwicklung einer neuen Generation emissionsreduzierter Feuerfestmaterialien für die Stahlindustrie.

Danksagung

Das Projekt wird dankenswerterweise durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter den Geschäftszeichen AN 322/15-2, AN 322/16-2 und AN 322/17-2 im Rahmen des SPP 1418 gefördert.

Literatur

- 1 Routschka, G.; Wuthnow, Hartmut: Taschenbuch feuerfeste Werkstoffe: Aufbau, Eigenschaften, Prüfung, 4. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen/Ruhr, 2007
- 2 Deneen, M. A.; Gross, A. C.: Refractory Materials: The Global Market, The Global Industry. Business Economics 45 (2010) [4] 288-295
- 3 The Freedonia Group Inc.: Industry Study #2968 Refractories, Dec. 2012
- 4 Aneziris, C.G., Rongos, V., Jin, S., Li, Y.: Benefits and Limitation of Additions of Nanostructured Particles in Carbon Bonded Refractories. IREFCON 2010 (8th India International Refractories Congress 2010), 4.-6. Februar 2010, Kolkata, Indien, Tagungsband, 38-44
- 5 Aneziris, C.G., Rongos, V.: Kohlenstoffgebundene Feuerfeste Formkörper oder Massen mit verbesserten thermomechanischen Eigenschaften, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2011 103 116.6
- 6 Li, Y., Aneziris, C.G., Jin, S., Sang, S., Chen, X.: Application of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Innovation in Advanced Refractories. In: Marulanda, J.M. (Hrsg.): Carbon Nanotubes Applications on Electron Devices. 1. Auflage, 2011, InTech (Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Kroatien), 351-366, ISBN 978-953-307-496-2
- 7 Rongos, V., Aneziris, C.G.: Improved thermal shock performance of Al₂O₃-C refractories due to nanoscaled additives. Ceramics International 38 (2012) [2] 919-927
- 8 Rongos, V., Aneziris, C.G., Berek, H.: Novel Al₂O₃-C refractories with less residual carbon due to nanoscaled additives for continuous steel casting applications. Advanced Engineering Materials 14 (2010) [4], 255-264
- 9 Freudenberg, B., Mocellin, A.: Aluminium titanate formation by solid-state reaction of fine alumina and titania powders, J. Am. Ceram. Soc. 70 (1987) [1] 33-38
- 10 Low, I. M.; Oo, Z.: Reformation of phase composition in decomposed aluminium titanate. Mater. Chem. Phys. 111 (2008) [1]. 9-12
- 11 Aneziris, C.G.; Pfaff, E.; Maier, H.R.: Ceramic materials in the system ZrO₂-TiO₂-Al₂O₃ for applications in the ferrous and non-ferrous metallurgy. Key Eng. Mat. (1997) [132-136] 1829-1833
- 12 Aneziris, C. G., Dudczig, S., Gerlach, N., Berek, H., Veres, D.: Thermal shock performance of fine grained Al₂O₃ ceramics with TiO₂ and ZrO₂ additions for refractory applications. Advanced Engineering Materials 12 (2010) [6] 478-485
- 13 Dudczig, S., Aneziris, C.G., Ballaschk, U.: Testing of thermal shock resistant fine grained alumina ceramics in a metal casting simulator. Refractories WOLRDFORUM 4 (2012) [1] 105-111

Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge

Ein Rück- und Ausblick mit einer Prise Fantasie ...¹

Jörg Matschullat

1 Die Herausforderung

Was nützt die beste Idee zur Entwicklung und Förderung einer neuen Technik, wenn die zu ihrer Realisierung notwendigen Rohstoffe entweder unerschwinglich oder erst gar nicht in ausreichender Menge verfügbar sind? Was bedeutet technologische Führerschaft, wenn nicht mehr vorgeführt werden kann, dass neue Ideen auch dem harten Test der Wirklichkeit standhalten? Derartige Fragen provozieren – und sind doch kein Ausfluss einer vollkommen absurden Fantasie. Schon mehrfach in der Geschichte menschlicher Kulturen sind Gesellschaften an Grenzen gestoßen, die mit der Verfügbarkeit von Ressourcen verbunden waren – und mit der Unfähigkeit, sich rechtzeitig an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen (Diamond 2005). Auch deshalb soll es hier um strategische Rohstoffe und um Risikovorsorge gehen.

Vieles an den heutigen Umbrüchen unterscheidet sich grundlegend von den Paradigmenwechseln früherer Zeiten. Niemals gab es eine auch nur annähernd so große Weltbevölkerung – mit einem entsprechenden Ressourcenbedarf. Auch

gab es bis vor kurzem keine wirklich globalen Herausforderungen, sondern im Wesentlichen nur regionale Konflikte, Probleme und Lösungen. Doch mit der Globalisierung, deren wirtschaftliche Realität den zögerlichen Fortschritten auf den Wegen des Erkennens vorausging, die mit den ersten Satelliten seit dem Sputnik-Start im Oktober 1957 ihren Anfang nahmen, erkennen und erleben wir nicht nur auf dem Gebiet der Wirtschaft, sondern vor allem auch mit unseren wissenschaftlichen Sichtmöglichkeiten das System Erde. Wir sind die erste Generation, die nahezu in Echtzeit natürliche Prozesse und anthropogene Rückkopplungen in diesem System beobachten kann. Dabei sind wir (leider) noch weit davon entfernt, dieses System wirklich vollumfänglich zu durchschauen, wengleich die Entwicklungen unverkennbar sind und uns daher zunehmend erlauben bzw. dazu anhalten, größere Erkenntnisfortschritte zu generieren [Cornell et al. 2012].

Zu den gesicherten Erkenntnissen gehört, dass wir Menschen weiterhin auf primäre Rohstoffe angewiesen sind und es auf absehbare Zeit sein werden, und dass wir aus mehreren Gründen zugleich das Potenzial der sekundären Rohstoffe besser ausschöpfen lernen müssen. Dabei ist das, was im deutschsprachigen Raum als Standard gilt (z. B. das Duale System Deutschland, DSD), keineswegs als weltweit normal zu betrachten (wengleich es mancherorts die Tendenz gibt, analoge Systeme aufzubauen). Zugleich erkennen wir zunehmend und weltweit, dass sowohl die Ressourcenrückgewinnung (Recycling) als auch die primäre Gewinnung nicht auf Kosten der Umwelt bzw. der Schutzgüter Wasser, Boden und Luft erfolgen

darf, sondern sowohl umwelt- als auch sozialverträglich zu sein hat, nach der Brundtland'schen Definition also „nachhaltig“. Dazu gibt es inzwischen nicht nur Ideen, sondern auch erste Vorbilder, die weiter unten konkreter benannt werden.

Ein Nachhaltigkeitsanspruch ist sicherlich leichter formuliert als realisiert – und je nach persönlicher Disposition können Betrachter zu eher pessimistischen oder auch optimistischen Ausblicken neigen. Die Herausgeber des Buches, aus dem dieses Kapitel auszugsweise hier abgedruckt werden darf, versuchen seit vielen Jahren, einen realistischen Blick auf die Wirklichkeit zu werfen und neben der Sachstandsanalyse Anregungen und einen Ausblick auf Potenziale und Möglichkeiten zu geben, was u. E. in der üblichen öffentlichen Diskussion eher zu kurz kommt. So ist auch jener Band entstanden, der in vier Teile mit jeweils mehreren Beiträgen gegliedert ist:

- I Rohstoffwirtschaft,
- II Primäre Rohstoffe,
- III Sekundäre Rohstoffe und Recycling – sowie
- IV Verarbeitung und Produkte.

Damit schließt er unmittelbar an das von denselben Herausgebern publizierte Werk mit dem Titel „Energie und Rohstoffe. Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft“ an [Kausch et al. 2011], das jedoch nur implizit auf strategische Elemente fokussiert ist.

2 Eine Nachlese

„Strategische“ Elemente bzw. Rohstoffe sind ein relativer Begriff. Für verschiedene Gesellschaften sowie zu unterschiedlichen Zeiten sind es jeweils andere Rohstoffe, die für uns Menschen strategische Bedeutung haben bzw. hat-

¹ Dieser Beitrag ist ein nur sehr geringfügig angepasster Vorabdruck des Kapitels 17 aus dem neuen Buch von Peter Kausch, Martin Bertau, Jens Gutzmer und dem Verfasser, das im November im Spektrum Verlag erscheinen wird (Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J, Hrsg; 2013, Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge. Spektrum Verlag, Heidelberg; 298 S.; ISBN 978-3-642-39703-5). Originale Querbezüge (►) wurden bewusst erhalten, um den Lesern der Acamonta die Möglichkeit zu geben, einen Vorgeschmack auf das Buch zu bekommen. Die Herausgeber würden sich natürlich über Ihr Interesse freuen und danken dem Spektrum-Verlag und Merlet Behncke-Braunbeck sehr herzlich für die Abdruckgenehmigung.

ten. Es ist eine wesentliche Aufgabe der Rohstoffwirtschaft, die Verfügbarkeit von Rohstoffen zu sichern. Dies ist keineswegs trivial, wie auch die Beiträge im ersten Teil des Bandes verdeutlichen.

I Rohstoffwirtschaft

Substitution von Rohstoffen ist nichts Neues (► *Kap. 1 von Liselotte Schebek und Beatrix Becker*), sondern eine in der gesamten Menschheitsgeschichte wiederholt praktizierte Handlungsweise, wenn es darum ging, Mangel auszugleichen. Dabei wirft die heute viel komplexer gewordene globale gegenseitige Abhängigkeit von Welthandels- und -wirtschaftsgeflechten zusätzliche Herausforderungen auf und erschwert – schon rein technisch gesehen – ein rationales und ressourcenschonendes Vorgehen. Letzteres bestätigt der Beitrag von Bertrand Demotes-Mainard aus Sicht eines großen Unternehmens (► *Kap. 2*). Er zeigt, dass die tiefe Spezialisierung – gerade im High-Tech Bereich der Industrie – nachgerade dazu zwingt, sehr komplex und auf mehreren Ebenen (Wissenschaft, Politik und Wirtschaft) synchron zu denken und zu handeln, um die Ansprüche der jeweiligen Produktlinien erfüllen und deren technische Realisation auf den Weg bringen zu können. Zugleich illustriert der Beitrag, dass zumindest mittelfristig intelligente Lösungen möglich sind und zugleich Bausteine und -pläne für künftig tragfähige Arrangements – jenseits von Firmeninteressen – entstehen können, z. B. das Thales Component Information System, das sowohl der firmeninternen Ressourcenoptimierung dient als auch eine wesentliche Voraussetzung für ein später effizientes Recycling darstellt. Reinhard Bütikofer diskutiert einen weiteren, sehr wesentlichen Aspekt: die Bedeutung der internationalen Kooperation auf dem Gebiet der Rohstoffpolitik (► *Kap. 3*). Statt Feind- und Zerrbilder aufzubauen (deren oft grausames und langfristiges Unheil mit sich bringende Konsequenzen wir in Europa nur zu gut kennen sollten), sind wir klug beraten, uns im Dialog und auf

gegenseitiger Augenhöhe um Lösungen zu bemühen. Auch unterschiedliche ethische Wertvorstellungen dürfen nicht als Vorwand dafür dienen, andere Systeme zu verteufeln oder auch nur zur innenpolitischen Propaganda zu nutzen. Ebenso wie die Substitution wird Effizienzsteigerung als ein Weg gesehen, reale oder vermeintliche Ressourcenverknappungen zu umgehen oder zumindest wesentlich hinauszuzögern.

Die Standardisierung von Produkten und technologischer Fortschritt werden von Andreas Dirk Wiek als ein Weg gesehen, solchen Verknappungen zu begegnen (► *Kap. 4*). Dessen ungeachtet müssen wir den Gedanken an uns her-



Knopfzellen in einer Sammelstelle in Kosaka, Akita Präfektur, Nordwest-Honshu, Japan. Die Bestandteile dieser sekundären Rohstoffe werden in modernsten Aufbereitungsanlagen des Dowa-Konzerns wieder in den Kreislauf der Wertschöpfungsketten eingespeist.

anlassen, dass wir Menschen über unsere gesamte Geschichte Effizienzgewinne eher nicht in ein „weniger“ an Nutzung bzw. ausufernder Dispersion investiert haben, sondern in ein „mehr“ und in Anwendungen, die einer noch breiteren und feineren Zerstreung der Nutzkomponenten Vorschub leisten.

Der abschließende Beitrag dieses ersten Teils – von Roland Mauss und Peter Posch – widmet sich vor allem den Marktpreisrisiken, denen rohstoffintensive Unternehmen ausgesetzt sind (► *Kap. 5*). Ihre Beschreibung – auch die der finanztechnischen Instrumente, mit deren Hilfe man sie etwas eingrenzen kann – erklärt sehr gut, wie stark inzwischen die Ressourcenwirtschaft im engeren Sinne, d. h. Bergbau und Folgeproduktionen, mit der Ressourcenwirtschaft im weiteren Sinne vernetzt ist,

also auch mit den Bereichen der Kapitaldienstleister und der Investoren. Diese Tatsache, die letzten Endes wiederum nicht neu, sondern nur in ihren finanziellen Dimensionen über das von vergangenen Dekaden her Gewohnte hinausgewachsen ist, ruft weitere Risiken auf den Plan, die von den für die Primärwirtschaft typischen weitgehend entkoppelt sind.

Besonders bedenklich ist hierbei das Auseinanderdriften von Anspruch der Gesellschaft (Produktnachfrage) und den Liefermöglichkeiten der Industrie (letztlich des Bergbaus). Während erstere einschließlich der Konsumgüterindustrie in Quartalen oder wenigen Jahren denkt und operiert, bemisst sich der Planungs- und Gestaltungshorizont der Montanwirtschaft nach Dekaden. Dass es angesichts einer solchen zeitlichen Diskrepanz im grundsätzlichen Herangehen zu wirtschaftlichen Problemen kommen muss (und kommt), vermag kaum zu überraschen. Hier sind wir als Gesellschaft sicherlich gut beraten, nicht mehr zu verdrängen, wo die von uns so geschätzten Produkte herkommen und uns mittel- bis langfristig auf eine andere Art des Wirtschaftens einzustellen (Patel 2010). Dies wird auch im dritten Teil dieses Buches explizit angesprochen.

II Primäre Rohstoffe

Seltene Erden, Lithium sowie Gallium, Germanium und Indium gehören zu den strategischen Elementen, die im Fokus des zweiten Teils des Buches stehen. Jens Gutzmer und Andreas Klosssek stützen sich in ihrer Analyse auf die Kritikalitätsmatrix, die Bradshaw et al. (2013) ausführlich erörtern, und konzentrieren sich auf Gallium und Indium im Zuge einer vertieften Diskussion (► *Kap. 6*). Deutlich wird in ihrer Arbeit die Begrenztheit des jeweils überschaubaren Zeithorizonts. Wie in den Diskussionen im ersten Buchteil bezieht sich hier das Gros der Aussagen auf einen Zeithorizont von wenigen Jahrzehnten. Das ist durchaus sinnvoll, weil nur innerhalb eines solchen Zeitrahmens Investitionen getä-

tigt und Primärproduktionsmengen gesteuert, d. h. beeinflusst werden können, mit den entsprechenden Rückwirkungen auf Produktentwicklung und Vertrieb. Ein Blick um wenige Jahrzehnte zurück zeigt deutlich, welche Dynamik in jedem Teil der Wertschöpfungskette allein in solch relativ kurzen Zeiträumen normalerweise schon auftritt, was auf noch längere Fristen bezogene Aussagen nicht nur schwierig, sondern teilweise schlicht unververtretbar sowie zum Diskussionsgegenstand eher rein akademischen Interesses macht.

Am Beispiel von Lithium gibt Wolfgang Voigt einen breiten, eindrucksvollen Überblick – sowohl zu diversen Vorkommen und den Herausforderungen ihrer Gewinnung als auch zu den sehr unterschiedlichen gesellschaftspolitischen Randbedingungen in den derzeitigen Lieferländern (► Kap. 7). Analog zu weiteren strategischen und auch derzeit nicht-strategischen Rohstoffen zeigt die Arbeit, dass für absehbare Zeit und auch bei steigendem Bedarf keine Verknappung von Lithium zu erwarten ist.

Dudley Kingsnorth berichtet über den globalen Markt der Seltenen Erden (► Kap. 8), ein Schwerpunktthema dieses Bandes. Dabei weist er auf die besondere Herausforderung hin, die darin besteht, effiziente Trennverfahren für die einzelnen Seltenerd-Elemente (SEE) zu entwickeln, um die teilweise noch sehr suboptimale Effizienz der Extraktion der Nutzkomponenten aus den komplexen Erzen zu erhöhen. Das ist vor allem deswegen so aufwändig, weil es praktisch für jede einzelne Lagerstätte eine „maßgeschneiderte“ Lösung zu finden gilt.

Die Seltenen Erden stehen im Mittelpunkt auch des Beitrags von Helmut Mischo, doch hier im Detail anhand der Herausforderungen illustriert, vor denen ein sich entwickelndes Land steht (► Kap. 9). Ohne qualifizierte Fachkräfte, ohne eine gute technische Infrastruktur vor Ort (Energieversorgung, Transportwege, Werkstätten, Gesundheitsversorgung, etc.) sind auch reiche Rohstoffvorkommen zunächst einmal wenig geeignet, die Entwicklung eines Landes zu befördern. Umso mehr gilt es auch dort, die Techniken der Erkun-

dung, des Abbaus und der Rohstoffverarbeitung weiter zu verbessern, weniger Energie und Schutzgüter zu verbrauchen bzw. zu belasten und zugleich auch geringere Wertstoffkonzentrationen effizient zu nutzen.

Damit befasst sich Duncan Large im Hinblick auf die Erkundung (► Kap. 10). Vor dem Hintergrund relativ weniger wesentlicher Neuentdeckungen von Lagerstätten zeigt er Forschungsbedarf auf und plädiert in motivierender Weise dafür, die inzwischen zumindest im akade-



Platingruppenelemente (Rh, Pd) und weitere Edelmetalle (Ag), Buntmetalle wie Kupfer (Cu) und Zink (Zn) sowie strategische Komponenten wie Germanium (Ge) und Antimon (Sb) werden an einem „Recyclingbaum“ in einer modernen Ausbildungsstätte für Recyclingingenieure in Kosaka, Akita Präfektur, Japan, visualisiert.

mischen Bereich bekannten und verfügbaren neuen Techniken in Geochemie, Geophysik und Mineralogie stärker in die Explorationspraxis einzuführen.

Der Verfasser dieses abschließenden Kapitels sieht in Deutschland eine wesentliche Diskrepanz zwischen der sachlichen Notwendigkeit einer exzellenten Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, die auf einer hervorragenden Forschungsinfrastruktur aufbaut, als unerlässliche Voraussetzung für eine wirklich nachhaltige Zukunftssicherung, und der aktuellen Realität. Kurzfristige „Exzellenzfeuerwerke“ wer-

den dieser Herausforderung definitiv ebenso wenig gerecht wie die künstliche Trennung in „Ausbildungs-“ (= Universitäten) und Forschungsstätten (wie Max-Planck-, Helmholtz-, Leibniz-, Fraunhofer und Blaue Liste-Institute und -Zentren).

III Sekundäre Rohstoffe und Recycling

Der dritte Teil des Buches befasst sich mit sekundären Rohstoffen und dem Recycling. Wie bereits oben angesprochen, liegt hier eine bei weitem nicht ausgereizte Möglichkeit, sowohl die Reichweite primärer Rohstoffe zu verlängern als auch mit potenziell geringerem Energieaufwand hochwertige Materialien zu gewinnen und einer neuen Nutzung zuzuführen. Dafür wird heute oft der Begriff „Urban Mining“ genutzt, weil in den Städten der Welt, in denen heute mit steigender Tendenz deutlich mehr als 50 % der Weltbevölkerung leben, so viele Wertstoffe zwischengespeichert sind, dass ihre Verwendung nicht nur sinnvoll, sondern in vielfacher Weise geboten ist.

Christian Hagelüken mahnt die Entwicklung und die Anwendung besserer Technologien an, um den maximalen Wiederverwertungswert aus Altmaterial aller Art zurückzugewinnen zu können (► Kap. 11). Dabei zeigt er, was bereits heute als beste verfügbare Technologie existiert, und zugleich plädiert er analog zu Andreas Wiek für ein klügeres Produktdesign, das bereits bei der Herstellung konsequent die Erfordernisse der späteren Wiederverwertung berücksichtigt.

Wolfram Palitzsch und Ulrich Loser zeigen diese Herausforderungen am Beispiel des Recyclings von Photovoltaik-Produkten und ziehen Querbezüge zur effizienteren Rückgewinnung von Seltenerdelementen aus entsprechendem Metallschrott (► Kap. 12). Die grundsätzliche Botschaft dahinter lautet, den Begriff „Abfall“ in letzter Konsequenz aus dem Wortschatz zu tilgen und stattdessen die Wertstoffe in dem nicht mehr genutzten, aber noch nutzbaren Material zu beachten.

Dies führen Harald Weigand und Martin Bertau, konsequent durchdacht, an einem äußerst kreativ realisierten Beispiel der erfolgreichen Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen vor

Augen (► Kap. 13). Die größten Herausforderungen lagen dabei eher weniger in der Entdeckung einer überzeugenden technischen Lösung, als vielmehr im Überwinden bürokratischer Hürden bei der gedanklichen Transformation eines „Abfallstoffs“ (Klärschlamm) in ein Produkt für die Landwirtschaft (Düngemittel). Solche Hürden aus „Blindheit“ gegenüber sinnvollen Innovationen bestehen leider in vielfältiger Form sowie auf zahlreichen Feldern und stehen real möglichen Durchbrüchen im Weg.

IV Verarbeitung und Produkte

Der vierte und letzte Teil des Buches widmet sich dem Ende der Wertstoffkette vor einer Wiederverwertung, nämlich dem Verarbeitungsgrad und der Qualität von Produkten. David Kennedy diskutiert in Fortsetzung des oben erwähnten Beitrags von Dudley Kingsnorth die Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerelementen (SEE, ► Kap. 14). Dabei differenziert er in seinem Beitrag zwischen den sehr verschiedenen Produkten, in die SEE eingearbeitet werden – als ein Augenöffner wohl für Viele, die sich sonst nicht die Frage stellen, was denn so in ihren alltäglich genutzten Produkten alles steckt.

Patrick Taylor dagegen unterzieht die Aufbereitungstechniken für mineralische Rohstoffe einer grundsätzlichen Bestandsaufnahme (► Kap. 15). Dabei unterwirft er den Bedarf an Wasser und Energie und die damit verbundenen Umweltbelastungen einer kritischen Betrachtung – und die daraus folgende Notwendigkeit der weiteren Entwicklung intelligenter Verfahrensmodelle, die erheblich zum Ressourcenschutz beitragen könnten, insbesondere die Möglichkeiten der (teil)automatisierten quantitativen Mineralogie und die besonderen Anforderungen an die auf kritische Materialien anwendbaren Trennverfahren.

Der abschließende Beitrag von Gerhard Roewer verdeutlicht am Beispiel der modernen Germaniumchemie die heute bereits gegebenen, aber öffentlich noch kaum bekannten Chancen und technischen Entwicklungslinien auf dem Gebiet der strategischen Elemente (► Kap. 16). Dabei wird deutlich, welches weitere Potenzial noch zu erschließen ist und welche Wissenslücken noch zu überbrücken sind, um Elemente wie Germanium, die nicht in eigenen Mineralspezies auftreten, möglichst vollständig aus den Primärerzen – ebenso wie später aus

Produkten – gewinnen und zugleich die Eigenschaften des jeweiligen Elements für intelligente Anwendungen optimal nutzen zu können. Es gibt also wenig Grund zum Schwarzsehen, sondern vielmehr die Notwendigkeit, weiterhin kreativ und mit vorausschauender Umsicht intelligente Lösungen zu entwickeln.

3 Was haben wir gelernt und wo stehen wir?

Lässt man diesen Band Revue passieren, wird klar, dass der Ressourcenbedarf einer nach wie vor wachsenden Weltbevölkerung für absehbare Zeit nicht mit einem noch so guten Recycling allein zu decken ist. Wir brauchen also weiterhin primäre Rohstoffe, und dies bis auf Weiteres in eher steigenden Mengen. Trotz anzunehmender technologischer Innovationen und Materialeinsparungen, trotz Substitution wird Bergbau weiterhin eine Zukunft haben (müssen), auch wenn weltweit zunehmend weniger Toleranz, bestenfalls Passivität, dem traditionellen Bergbau entgegengebracht werden wird und Bürger – nicht nur in den „alten“ Industrienationen Europas und Nordamerikas, sondern auch in afrikanischen, asiatischen und lateinamerikanischen Ländern – zunehmend (und zu Recht) kein Verständnis mehr aufbringen wollen für eine Ressourcenwirtschaft, die zukünftigen Generationen Lasten aufbürdet und die Umwelt schädigt.

Die Wirtschaftskrise seit 2008 – denn überwunden ist sie nicht – hat zumindest in den Köpfen vieler Akteure, von Alan Greenspan bis hin zu Staatsoberhäuptern, erstmals die Dogmen eines Großteils der Wirtschaftswissenschaftler erschüttert, dass „der Markt“ es schon richten werde. Das berühmt-berüchtigte Buch von Raj Patel (2010) „The Value of Nothing. Was kostet die Welt?“ legt dazu beredt Zeugnis ab, und die teilweise harschen Reaktionen darauf zeigen, dass es offensichtlich einen Nerv getroffen hat.

Doch es ist nicht die Ressourcenwirtschaft per se, die für diese Wirtschaftskrise verantwortlich ist; ein Wirtschaftssektor, der reale Werte schafft und sehr konservativ strukturiert ist – dessen ungeachtet, dass es längst Spieler am Rande der primären Ressourcenwirtschaft gibt, die mit den „commodities“ ungezügelt spekulieren und in nicht wenigen Fällen eher für unangemessene Preisschwankungen und künstlichen Mangel oder ebenso künstliche Überschüsse sorgen.

Mit diesen Aberrationen des Marktes fügen sich die Gesellschaften Schaden zu, denn der Bergbau bzw. die gesamte Wertschöpfungskette der Ressourcenwirtschaft: Das ist kein Sprunghaftigkeit vertragendes oder erzeugendes Metier, sondern es basiert von Haus aus auf für Jahrzehnte angelegten Investitionen.

Diese Situation wird sich absehbar noch verschärfen – insofern, als der Zugang zu primären Rohstoffen zunehmend sowohl einen höheren und aufwendigeren Technisierungsgrad verlangt, zugleich aber (zu Recht) strengere Umweltkontrollen unterliegt und auf Gesellschaften trifft, die immer weniger bereit sind, Kompromisse im Hinblick auf Folgelasten einzugehen. (Dabei wäre es nicht nur wünschenswert, sondern es wird erforderlich, dass die Gesellschaften in Konsequenz dieser berechtigten Wünsche auch bereit sind, ihr Konsumverhalten zu verändern und in längeren Zyklen zu denken – und zu handeln). Ebenfalls wäre ein (auch technologisches) „Weiter so“ gleichbedeutend mit einer anderen Herausforderung: der Kritikalität (auch kostenseitig) einer ausreichenden Energieversorgung. Denn der Bergbau und die ihm nachgeschalteten Wertschöpfungsketten sind elementar darauf angewiesen, ihren Energiebedarf möglichst störungsfrei decken zu können (► z.B. Kap. 9 am Beispiel Namibias). Unabhängig davon, wie optimistisch jemand diese Kritikalität mittel- bis längerfristig betrachtet, dürfte es wenig Dissens dahingehend geben, dass die Verfügbarkeit von Primärenergie ebenso wichtig ist bzw. sein wird wie die ausreichender Mengen an (mineralischen) Rohstoffen [Bardi 2013: 155; Bradshaw et al. 2013].

Vor diesem Hintergrund deuten sich mehrere Handlungsstränge an, die im Folgenden angesprochen werden. Unter Anerkennung der weiteren und vermutlich auf lange Zeit eindeutigen Notwendigkeit von Erkundung, Bergbau und Aufbereitung von Rohstoffen, um eine wachsende Weltbevölkerung mit Gütern versorgen zu können, steht zugleich die Forderung, dass dies umwelt- und sozialverträglich zu geschehen hat [Wäger et al. 2012]. Denn parallel zu dieser Anerkennung steht eine weitere Erkenntnis – die von den grundsätzlich endlichen Ressourcen, zu denen nun auch die Schutzgüter Luft, Boden und Wasser zu zählen sind. Überspitzt ausgedrückt, können wir Menschen sicherlich ohne

Mobiltelefone und Automobile leben, doch kaum ohne saubere Luft und sauberes Wasser sowie fruchtbaren Boden.

Eines der größten Hindernisse, die wir uns selbst aufstellen, ist unsere dominante Fixierung auf ein mehr oder minder lineares Denken [z. B. Leggewie und Welzer 2010]. Wir behaupten zwar von uns selbst, rationaler Akteur zu sein, doch bei genauerer Analyse stellt sich meist schnell heraus, dass diese Ratio die komplexe Wirklichkeit nur ausschnittsweise wahrnimmt und im wahrsten Sinne einer Art von Pippi Langstrumpf-Philosophie frönt, die sich bekanntlich die „Welt so macht, wie sie ihr gefällt“. Diese Mischung aus kindlicher Hybris, Naivität und Sturheit bzw. auch Verdrängung der komplexen Wirklichkeit bremst oder verhindert kreatives Denken und Phan-

und Konflikte, die es seit vielen Generationen gibt – vermutlich seit sich Homo sapiens sapiens entwickelt hat. Und umgekehrt liegt ja auch die Beweislast dafür, dass ein anderer Weg besser, klüger, eher zielführend sei und mehr im Interesse der Allgemeinheit liegt, bei denjenigen, die eine Änderung verfolgen und behaupten, die besseren Lösungen zu haben.

4 Neue Wege in die Zukunft des Bergbaus?

Die Seite 1 in diesem Band zeigt ein Bild der Phoenix Mine bei Skouriotissa auf Zypern. Dort wird eine Lagerstätte seit 2000 Jahren nahezu kontinuierlich abgebaut [http://www.cyprusgeology.org/english/3_4_mineral.htm]. Das ist außergewöhnlich und dennoch lässt sich

abgebaut wurden. Zugleich erschienen Land und Umwelt „unendlich“ und trotz bereits existierender Erfahrung mit Ressourcenverknappung gelang es bis dato noch fast jeder Generation, diese Erfahrung zu verdrängen. Unabhängig davon, dass das konkrete Beispiel der Phoenix Mine als Tagebau mit potenziell größeren Umweltrisiken verbunden ist als beispielsweise der ebenfalls viele Jahrhunderte alte Untertage-Bergbau im Rammelsberg bei Goslar, geht es heute darum, einen ressourcenschonenden Abbau zu betreiben. Damit ist sowohl gemeint, ein Maximum an Wertstoffen abzubauen und zu verwerten als auch zugleich den Bergbau in einer Weise zu betreiben, die einen minimalen ökologischen Fußabdruck hinterlässt.

Heute leben wir im Anthropozän



Historischer Bergbau unterschiedlicher Phasen – vom Mittelalter (rechts) bis in die frühe Neuzeit (links) in Japan

tasie und begnügt sich mit einem „Weiter so“. Damit stehen wir uns selbst im Weg und machen es zusätzlich denjenigen besonders schwer, die in der Lage sind, komplexer, kreativer und „um die Ecke“ zu denken. Im besten Fall verlieren wir so lediglich Zeit.

Doch wäre es auch naiv zu glauben, dass es ausschließlich solche Einschränkungen im Denken sind, die dazu führen, sogar bekannte Alternativen nicht sehen oder nutzen zu können. Denn stets ist auch die Frage zu stellen „cui bono?“, wem dient es denn, wenn alte Wege weiter beschritten werden, wenn es keine Kursänderung gibt. In vielen Fällen genügt es sogar, die Frage zu stellen, wer daran verdient [Orestes u. Conway 2011].

Beide Wege beschreiben gesellschaftliche und menschliche Normalzustände

an diesem Beispiel etwas veranschaulichen. In der Vor- und Frühgeschichte konnten wir Menschen nur einige wenige Minerale abbauen und sehr wenige Elemente real verarbeiten. Bergbau war sehr selektiv und trennte vor Ort die Wertbestandteile vom Rest ab. Das nicht nutzbare Material, der Abraum, den wir zum Teil noch heute in den Bergbauregionen der Welt vielgestaltig antreffen können, war relativ gering. Mit zunehmenden Kenntnissen und der Technologieentwicklung stieg die Zahl der nutzbaren Minerale und damit auch die der verarbeitbaren Elemente an; besonders rasant erst ab dem 20. Jahrhundert. Die Abraumengen wurden nicht geringer – einfach, weil die abgebauten Materialmengen stiegen und weil zunehmend geringer konzentrierte Erze

[Crutzen 2011], dem Zeitalter, in dem wir Menschen das Gesicht der Erde sehr wesentlich beeinflussen – zum Teil nach wie vor, ohne alle Konsequenzen überblicken oder gar erkennen zu können. In Analogie zu Energieversorgungsfragen sind wir sicherlich auch deshalb gut beraten, nicht allein bestimmten einzelnen Formen von Bergbau und Rohstoff-Verarbeitung gegenüber anderen Möglichkeiten den absoluten Vorrang einzuräumen. Stattdessen ist wohl anzuraten, alle gangbar erscheinenden Wege zu prüfen und zumindest auszuprobieren, sofern dies nicht mit allgemein als absurd zu bezeichnenden Risiken verbunden ist. Nur so lassen sich mit gewisser Wahrscheinlichkeit optimale Lösungen (für den jeweiligen Stand von Technik und Erkenntnis) finden. Dabei wird schnell

deutlich, dass selbst eine solch harmlose Empfehlung bereits Widerspruch provoziert, allein, weil darin im Sinne Ernst Friedrich Schumachers bereits eine Bedrohung zentralistischer Macht gesehen werden kann [Schumacher 2013].

So motivierte uns kürzlich in Freiberg Professor Robin Batterham, leitender Kopf von Rio Tinto, doch mutiger zu sein beim Betreten auch ungewöhnlicher und risikoträchtiger Pfade. Er hielt zur Einweihung des Biohydrometallurgischen Zentrums Freiberg (BHMZ) den Plenarvortrag und lobte dabei ausdrücklich das große private Engagement der Krüger-Stiftung für ein Projekt, dessen Erfolg erst nach mehreren Jahren erkennbar werden kann [http://tu-freiberg.de/presse/aktuelles/aktuelles_detail.html?Datensatz=1758 und http://tu-freiberg.de/forschung/bhmz-3].

In diesem Buch haben wir Substitution und Ressourceneffizienz ebenso diskutiert wie die Notwendigkeit von mehr und klügerer Erkundung und besserer Aufbereitung. Vom eigentlichen Bergbau und den damit verbundenen Technologien dagegen war praktisch kaum die Rede. Doch müssen im Jahr 2050 unbedingt Bergleute in Schächte und Tunnel? Ist es nötig, dass übertage Bergehalden und stetig wachsende Absetzanlagen (Tailings) Flächen in Anspruch nehmen und zugleich durch Flugstaub, Lärm und Sickerwässer ihre Umgebung beeinträchtigen?

Biorecovery oder Heap Leaching (mikrobielle Erzlaugung) sind keine neuen Begriffe. Bereits vor mehr als 2.000 Jahren wurde diese Technik in China praktiziert (Ehrlich 2001). Doch bis heute findet dies übertage statt und wird durchaus effektiv auf aufgehaldetes Material angewendet. Stellen wir uns nun einen Bergbau vor, bei dem an der Oberfläche weder Halden noch Absetzanlagen, ja selbst kaum mehr flächenversiegelnde Großanlagen zu sehen sind. Auf kleinen Flächen stehen Anlagen, die als Schnittstelle zwischen tief im Untergrund ablaufenden Prozessen und an geeigneten Orten befindlichen Kapazitäten zur weiteren Reinigung von Reicherzlösungen fungieren. Diese Nutzkomponenten wurden von Bakterien im tiefen Untergrund direkt aus dem vererzten Gestein gelöst, denn nahe der Erdoberfläche wird es zunehmend schwieriger, reiche Vorkommen zu finden.

Bei der kontinentalen Tiefbohrung auf der Kola-Halbinsel (Russland) von



Moderne Recyclinghütte in Kosaka nach Konversion des ehemaligen Hüttenkombinats; Akita Präfektur, Japan

1970 bis 1989 traf man in mehr als 10 Kilometern Tiefe lebende Bakterien an, die nicht von der Oberfläche eingeschleppt worden waren. Über Tiefbohrverfahren können Wegsamkeiten geschaffen werden, um gezielt wertstofflösende Bakterien in den Untergrund einzubringen und zugleich deren Wohlbefinden kontrolliert zu optimieren, um maximale Ausbeuten der gesuchten Komponenten zu erreichen. Denn bestimmte Bakterien praktizieren bei ihrem Stoffwechsel den metabolischen Zersatz von Mineralen und setzen dabei von uns Menschen erwünschte Elemente in Lösung frei. Da die zirkulierenden Lösungen im geschlossenen Kreislauf geführt werden können (die Technik dazu ist bekannt), sollte das Vorgehen auch grundsätzlich möglich sein. Doch bevor in sehr große Tiefen vieler Kilometer der Erdkruste vorgedrungen werden wird, müssen Versuche unter realistischen Bedingungen in wenigen Hundert Metern Tiefe zeigen, dass die grundsätzlichen Ansätze und Ideen funktionieren. Dabei gehört neben bohrtechnischen, bergbaulichen, (bio) geochemischen, hydrogeologischen und mikrobiologischen Arbeiten auch eine Reihe anspruchsvoller ingenieurtechnischer Arbeiten zu Aufbereitungstechnik und Maschinenbau dazu, um die Gewinnungskette zu voller Funktionalität (und Sicherheit) zu entwickeln.

Dass diese Ideen kein Wolkenkuckucksheim sind, zeigen Arbeiten zum

Beispiel auch in Japan, wo der Verfasser jüngst sehr ähnliche Versuche beobachten durfte. Dort liefern geothermische Quellen zugleich potenziell so hohe Energiemengen, dass damit der gesamte Produktionsstrang betrieben werden könnte. Interessanterweise setzt das Land dennoch nach wie vor eher auf Nuklearenergie, obgleich es bereits eine Reihe beachtlicher und sehr leistungsfähiger Geothermalkraftwerke gibt.

Im Ergebnis würde der Bergbau der Zukunft gezielt Wertstoffe aus größerer Tiefe an die Tagesoberfläche bringen, aus den Erzen gelöst durch Bakterien und gestützt durch Robotik, gefördert über Pumpen in quasi geschlossenen Systemen. Wasser wird im Kreislauf gefahren und ein Teil der nötigen Energie wird direkt aus den geothermischen Gradienten gewonnen. Die geförderten Lösungen gehen übertage in eine chemische Trennung, in der die Wertstoffe direkt abgesondert und weiterverwertet werden. Sollten diese Anstrengungen belohnt werden, dann wird Bergbau in einer absehbaren Zukunft bislang unerreichbare Lagerstätten allein mit Hilfe von Robotik und mikrobieller Aktivität „abbauen“ und lediglich wertstoffreiche Lösungen an die Oberfläche transportieren, wo die einzelnen Komponenten dann über Trenn- und Fällungsprozesse in die Festphase überführt und der weiteren Nutzung als reiner Rohstoff zugeführt werden.

Das ist Ihnen zu viel Fantasie? Geben Sie doch einmal die Stichworte „Future Mining“ bei Ihrer Suchmaschine im Internet ein – und Sie werden vermutlich überrascht sein, dass wir nicht die einzigen sind, die an diesen Konzepten aktiv arbeiten.

Zum Abschluss sei deshalb ein Beispiel angesprochen, das zwischen diesen „Zukunftsfantasien“ und dem traditionellen Bergbau steht – und Ende des Jahres 2013 seine Produktion aufnehmen wird: die Grube Niederschlag im Erzgebirge [<http://www.lapis.de/aktuelles/neuigkeiten/45-premiere-neuer-fluoritbergbau-im-saechsischen-erzgebirge-012011>]. Basierend auf einer alten Grube, die im Tiefbau betrieben wurde, konnte das Bergwerk neu aufgewältigt und mit moderner Technik unter Tage ausgestattet werden. Dafür galt es, sozusagen maßgeschneiderte Technik nach Untertage zu verbringen und zu installieren – ein echtes „Designer-Bergwerk“ zu erfinden. In der jetzt folgenden Bergbauphase wird es keine Halden oder Absetzteiche mehr geben. Das primäre Erz

wird Untertage zerkleinert und aufbereitet; der nicht nutzbare Abraum verbleibt Untertage und verfüllt dort die entstandenen Hohlräume. Die Übertageanlagen sind eher klein und unauffällig und das Untertage gewonnene Vor-Konzentrat wird Übertage per Bahn oder LKW in die nächste Hütte transportiert (Nickelhütte Aue). Anwohner im dicht besiedelten Erzgebirge werden weder Erschütterungen noch Lärm oder Staubbelastung zu befürchten haben, wenn der Betrieb ordnungsgemäß abläuft [Matschullat u. Gutzmer 2012].

Quellenverzeichnis

- Bardi U (2013) Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. Ein Bericht an den Club of Rome. Oekom Verlag, München, 355 S.
- Bradshaw AM, Reuter B, Hamacher T (2013) The potential scarcity of rare elements for the Energiewende. *Green* 3, 2: 93-111
- Cornell SE, Prentice IC, House JI, Downy CJ (2012) Understanding the Earth system. Global change science for application. Cambridge University Press, Cambridge, 267 S.
- Crutzen P (2011) Die Geologie der Menschheit. In: Crutzen P, Davis M, Mastrandrea MD,

Schneider SH, Sloterdijk P (Hrsg) Das Raumschiff Erde hat keinen Notausgang. Edition Unseld, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 113 S.

- Diamond J (2005) Kollaps. Warum Gesellschaften überleben oder untergehen. S. Fischer Verlag, Frankfurt a.M., 800. S.
- Ehrlich HL (2001) Past, present and future of biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 59, 2-3: 127-134
- Leggewie C, Welzer H (2010) Das Ende der Welt, wie wir sie kannten. Klima, Zukunft und die Chancen der Demokratie. S. Fischer Verlag, 288 S.
- Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg; 2011) Energie und Rohstoffe. Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 193 S.
- Matschullat J, Gutzmer J (2012) Mining and its environmental impacts. In: Meyers RA (Hrsg) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* 9: 6633-6645. Springer Verlag, New York
- Orestes N, Conway E (2011) The merchants of doubt. How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming. Bloomsbury Press, London, New York, 368 S.
- Patel R (2010) The value of nothing. Was kostet die Welt? Riemann Verlag, München, 288 S.
- Schumacher EF (2013) Small is beautiful: Die Rückkehr zum menschlichen Maß. Oekom Verlag, München, 320 S.

Fünf Jahre Freiburger Hochdruckforschungszentrum

Jens Kortus

Das Freiburger Hochdruckforschungszentrum (FHP) ist im Oktober 2007 gegründet worden, um neue, ultraharte Werkstoffe zu entwickeln und praktische Einsatzmöglichkeiten für sie zu finden. Gemäß dem Profil der TU Bergakademie Freiberg sollen diese Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Ressourcenerschließung – vorzugsweise im Bereich der Gesteinszerstörung und speziell im Bereich der auf Öl, Gas und Erdwärme angesetzten Tiefbohrtechnik – liegen.

Im FHP werden bereits bestehende Kompetenzen an der TU Bergakademie auf den Gebieten der Hochdrucksynthese, der Prüfung unter extremen Belastungen (Druck, Temperatur, Geschwindigkeit), der Phasen-, Stoff- und Mikrostrukturcharakterisierung, der Schockwellensynthese und -belastung (Stoßwellen) sowie der Modellierung von Materialien und der anwendungsorientierten Forschung fakultätsübergreifend gebündelt. Per Zusammenführung ganz unterschiedlicher, aber komplementärer Arbeitsgebiete sollen neue Hochleistungswerkstoffe entwickelt werden. Die Entwicklung neuartiger Materialien erfordert einen hohen maschinellen Auf-

wand, sodass die Schaffung der notwendigen wissenschaftlichen Infrastruktur einen wichtigen Erfolg des FHP bedeutet. Zu diesem gehören:

- Ein Schockwellensyntheselabor im Bergwerk der TU Bergakademie Freiberg, in dem mit Explosivladungen Drücke erzeugt werden können, die denen von Meteoriteneinschlägen entsprechen. Die Forschergruppe hat bereits zahlreiche, spektakuläre Sprengversuche durchgeführt und eine Reihe hochinteressanter Materialien erzeugt, die nun analysiert werden. Auch das Fernsehen (3Sat) hat sich bereits für dieses Projekt interessiert und im Rahmen einer Dokumentation darüber berichtet. Im weiteren Verlauf der Forschungen geht es darum, die Sprengversuche zu optimieren, um die Mengen an den gewünschten Materialkombinationen zu maximieren.
- Eine Hochdruckpresse, mit der Drücke erzeugt werden können, die doppelt bis drei Mal so groß sind, wie zur industriellen Herstellung von Diamanten erforderlich, wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Auch hier werden unter definierten Bedingungen (Druck und

Temperatur) bereits neue Materialien synthetisiert und analysiert.

- Eine Spark-Plasma-Sintering-Anlage, mit der Pulvermaterialien zu größeren Prüflingen zusammengebacken werden können, ohne dass die Ausgangsmaterialien ihre auf ihrer nanoskaligen Kornstruktur beruhenden Eigenschaften verlieren. Da bisher nur geringe Mengen an solchen neuartigen Materialien erzeugt werden konnten, arbeitet das FHP auch an der Optimierung der Eigenschaften bekannter Materialien, um die Vorgänge beim Sintern im Detail verstehen und steuern zu können.
- Ein Bohrversuchsstand wurde aufgebaut, an dem sich verschiedene Materialien hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens beim Bohren untersuchen lassen.
- Ein Hochgeschwindigkeitslabor wurde wesentlich erweitert, in dem verschiedene Materialien hinsichtlich ihres Verhaltens unter schlagartigen Beanspruchungen bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht werden.
- Ein in dieser Ausführung weltweit einmaliges Großschergerät wurde aufgebaut, mit dem Gesteinszerstörungs-

vorgänge untersucht werden können. Es wird verwendet, um die theoretischen Modelle zur Gesteinszerstörung zu verifizieren und die Simulationsparameter zu optimieren.

Diese wissenschaftliche Infrastruktur und Kompetenz ist auch für andere Großforschungsprojekte der TU Bergakademie wichtig und wird in Zusammenarbeit mit den Sonderforschungsbereichen 799 und 920 im Rahmen mehrerer Projekte auch intensiv genutzt. Ein Beispiel dafür ist die Untersuchung der martensitischen Phasenumwandlung in einem TRIP-Stahlguss-Werkstoff, die durch hydrostatische Hochdruckbehandlung bei 15 Gigapascal genauer charakterisiert wurde. Die Untersuchungen erfolgten dabei sowohl an der Hochdruckpresse in Freiberg, als auch im Zusammenhang mit einem gemeinsamen Besuch von SFB- und FHP-Forschern am Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg. Ein dort installiertes Hochdruckdiffraktometer erlaubt es, die Änderungen der Kristallstruktur der Probe mittels starker Röntgenstrahlung ‚live‘ mitzuverfolgen und aufzuzeichnen.

Die Professoren des FHP beteiligen sich auch führend am Spitzentechnologiecluster der sächsischen Landesexzellenzinitiative „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch Atomares Design und Defekt-Engineering“ (ADDE), deren Sprecher Prof. David Rafaja ist. Eines der zentralen Projekte ist der Entwicklung von Volumenhardtstoffen gewidmet, die auch als Zukunftsthema für die TU Bergakademie Freiberg von Bedeutung sind.

Im Weiteren stellen wir einige ausgewählte Erfolgsgeschichten aus dem FHP vor. Darüber hinaus existieren natürlich noch weitere bemerkenswerte Ergebnisse aus den einzelnen Teilprojekten, die hier aus Platzgründen nicht präsentiert werden können.

Das Freiburger Schockwellensyntheselabor

Das Freiburger Schockwellensyntheselabor unter Leitung von Prof. Gerhard Heide wurde in mehreren Etappen während der letzten Jahre aufgebaut und mit der Fertigstellung der neuen Sprengkammer und der Installation der notwendigen Sicherheitstechnik am 11. September 2012 in Betrieb genommen. Die Anlage erlaubt nun Sprengexperimente (Abb. 1) mit einer Explosivmasse von bis zu 25 kg, was für eine universitäre Ein-



Abb. 1: Vorbereitung eines Schockwellensynthese-Experiments mit einer großen Ladung von 5,1 kg hochbrisantem Sprengstoff

richtung international einmalig ist. Die Zusammenarbeit mit dem Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ und „Alte Elisabeth“ ist hervorzuheben. Durch dieses Projekt erfährt die Stätte eine völlig neue Nutzung. Unsere Universität besitzt so ein weiteres, international beachtliches Alleinstellungsmerkmal.

Zu den herausragenden Erfolgen gehört die Entwicklung eines Probencontainers für Schockwellensynthese-Experimente, der unter allen zum gegenwärtigen Zeitpunkt möglichen Druck- sowie Temperaturbedingungen eine vollständige Probenrückgewinnung garantiert. Die Probenmengen betragen gegenwärtig 0,2 bis 7,2 g pro Versuch im Druckbereich von 15 bis 161 Gigapascal. Damit können kurzzeitig Bedingungen erzeugt werden, wie sie im äußeren Erdkern, in mehr als 3.000 km Tiefe, herrschen.

Es besteht bereits internationales Interesse an einer Übernahme dieses Systems (Prof. T. Sekine, Japan). Die erfolgreiche Demonstration von reproduzierbaren Schockwellenexperimenten führte auch schon zu zahlreichen nationalen (im Rahmen des SPP 1236 „Strukturen und Eigenschaften von Kristallen bei extrem hohen Drücken und Temperaturen“) und internationalen Kooperationen. So wurden gemeinsam mit dem Institut JIHT-RAS (Joint Institute of High Temperature, Russian Academy of Science) bereits erfolgreich erste Experimente an Stählen beziehungsweise Legierungen durchgeführt. Auch hierbei konnten die Proben ohne sichtbare Frakturen bzw. Risse nach den Experimenten entnommen werden (Probendurchmesser 45–50 mm, Probenhöhe 50 mm). Diese Versuche stehen teilweise im Zu-

sammenhang mit der Messung von Parametern der Zustandsgleichung (spezifisches Volumen und Temperatur in Abhängigkeit von der Schockintensität) der betreffenden Stoffe am JIHT-RAS.

Ein neues Forschungs- und Anwendungsgebiet wurde durch Projekte zum Explosivplattieren unter Einbeziehung des Instituts für Metallformung sowie in Kooperation mit der Russischen Akademie der Wissenschaften (Institute of Structural Macrokineitics and Materials Science-RAS, Cernogolovka) eröffnet.

Das Freiburger Schockwellensyntheselabor hat es geschafft, in relativ kurzer Zeit vom „Stand Null“ zu nationaler und internationaler Anerkennung zu gelangen und ist zu einem wichtigen Aushängeschild der TU Bergakademie Freiberg avanciert.

Neue Hartstoffe und Hochdruckphasen

Mit dem von der Krügerstiftung finanzierten Hochdrucktechnikum und der über einen DFG-Großgeräteantrag beschafften 1000-Tonnen-Hochdruckpresse am Institut für Anorganische Chemie wurde ein tragender Eckpfeiler für die Hochdruckforschung an der TU Bergakademie durch Prof. Edwin Kroke und Dr. Marcus Schwarz errichtet.

Das Konzept für neue Materialien zielt auf die Synthese von maßgeschneiderten Ausgangsmaterialien mittels präparativer chemischer Methoden und die Verdichtung dieser Stoffe mit Hilfe der Hochdruckpresse oder von Schockwellen zu Hartstoffen oder neuen Hochdruckphasen. Im Schockwellenlabor wurden so Si/O/N-Nanopulver mit Spinellstruktur erzeugt. Das Material leitet sich vom

Spinell-Siliciumnitrid ($\gamma\text{-Si}_3\text{N}_4$) ab. Diese nach Diamant und kubischem Bornitrid (c-BN) vermutlich dritthärteste bekannte Einzelsubstanz war unter Beteiligung von Edwin Kroke und Marcus Schwarz 1999 an der TU Darmstadt entdeckt worden.

Im Schockwellenlabor der TU Freiberg konnten Nanopulver aus $\gamma\text{-Si}_3\text{N}_4$ und erstmals auch Spinell-Si/O/N im Maßstab von mehreren Gramm je Experiment hergestellt und eingehend charakterisiert werden. Beispielsweise wurden mittels Neutronenbeugung am Forschungsreaktor des Helmholtz-Zentrums für Materialien und Energie in Berlin Erkenntnisse über den Einbau der Sauerstoffatome in das Kristallgitter gewonnen. Durch Variation des Sauerstoffgehalts lassen sich die Härte und andere Festkörpereigenschaften innerhalb bestimmter Grenzen variieren. Die feinen Pulver könnten dabei für Schleif- und Poliersuspensionen in der optischen Industrie zum Einsatz kommen. Dies erscheint gerade vor dem Hintergrund der leichten Verfügbarkeit der Elemente Si, O und N im Gegensatz zu den bisher verwendeten seltenerd-basierten Poliermitteln attraktiv und entspricht ganz dem ressourcenzentrierten Profil der TU Bergakademie. Interesse seitens der Industrie wurde bereits bekundet.

Ultraharte Bornitrid-Nanokomposite sind aus Anwendersicht beim Schneiden und Bohren besonders aussichtsreich. Diese wurden als vielversprechende Materialien im FHP intensiv untersucht und sollen im Rahmen des FHP-Transferprojekts unter Leitung von Prof. Lutz Krüger konkreten Anwendungen, zum Beispiel einer Verwendung als Drahtziehösen (Bild), zugeführt werden. Es handelt es sich dabei um einen Verbundwerkstoff, bei dem alle drei bekannten Modifikationen des Bornitrids – kubisches c-BN, wurztitisches w-BN und eine geringe Menge des grafitartigen, weichen hexagonalen h-BN – als Gefüge innig miteinander verzahnter Nanokristalle vorliegen. Dieses Gefüge verleiht dem Material seine außerordentlich hohe Härte, die über der von c-BN-Einkristallen liegt und bis an 70 % der Härte von Diamant heranreicht. Dabei ist das Material bis mindestens 1.200 °C thermisch beständig und kann im Gegensatz zu Diamant im mechanischen Kontakt zu Eisenmetallen eingesetzt werden.

Die Nanokomposite entstehen durch Hochdruck-/Hochtemperaturbehand-

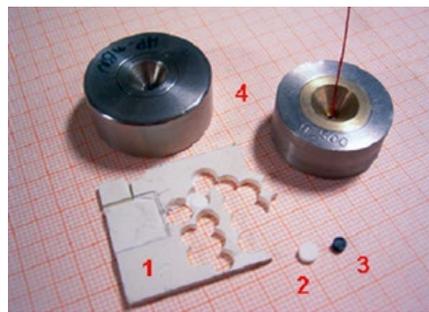


Abb. 2: Vom Ausgangsmaterial zur Drahtziehöse: Aus einer Platte aus hochreinem pyrolytischem Bornitrid (1) werden mittels CNC-Fräse kleine Zylinder (2) herausgetrennt. Durch Hochdruck-Hochtemperaturumwandlung in einer Multianvil-Pressen entsteht ein superharter Ziehsteinrohling (3), der eingefasst, lasergebohrt und zu einer einsatzfähigen Ziehöse poliert wird.

lung von sehr reinem, pyrolytisch abgeschiedenem h-BN oberhalb von ca. 10 GPa und bei Temperaturen von 1.500–1.800 °C.

Auch zur lokalen Industrie ergeben sich interessante Anknüpfungspunkte. So ist das für die Synthese der BN-Nanokomposite benötigte Ausgangsmaterial BN zugleich das Standard-Beschichtungsmaterial für Kristallzuchtziegel zur Herstellung von Halbleiterkristallen wie Galliumarsenid (GaAs). Beim Heraustrennen von GaAs-Einkristallen, die durch gerichtete Erstarrung (Bridgman-Verfahren) erzeugt werden, haftet oft eine dünne Schicht des BN an diesen an, sodass die Tiegel einem kontinuierlichen Verschleiß unterliegen und in regelmäßigen Abständen ausgetauscht und entsorgt werden müssen. In manchen der ausgemusterten Tiegel bleibt jedoch die ursprüngliche BN-Wandstärke erhalten, sodass dieses wertvolle Abfallmaterial in Zukunft nach einer entsprechenden Dekontamination einer sinnvollen Zweitverwendung als superharter Werkstoff zugeführt werden könnte. Zumindest kleine Ziehsteine für sehr feine Drähte ließen sich auf diese Weise realisieren. Die Aussicht, auf diesem Wege wieder einen Stoffkreislauf schließen zu können, harmoniert ebenfalls recht gut mit dem Profil der TU Bergakademie als Ressourcenumiversität.

Es werden zudem weitere Ansätze zur Verwendung der Bornitrid-Nanokomposite verfolgt, z.B. ihre Nutzung als Stempelmateriale für Hochdruckzellen und zur Mikropräzisionszerspannung, wo bislang hochpräzise Schneiden aus Diamant mit den entsprechenden Limitationen bezüglich der Bearbeitung

von Stahl und Eisenlegierungen, zum Einsatz kommen. Das FHP bedankt sich an dieser Stelle herzlich bei Freiburger Compound Materials (FCM) GmbH für die Zurverfügungstellung verschiedener BN-Materialien. Ebenfalls bedanken wir uns für erste Drahtziehversuche bei der Freiburger Firma Thiele und Steinert, der ältesten noch bestehenden Drahtzieherei der Welt. Der am FHP gefertigte Ziehstein war dabei vier Monate bei Thiele und Steinert im sog. „Vorzug“ testweise im Einsatz. Während dieser Zeit wurden mit ihm 7,2 Tonnen Kupferdraht zu einem Nenndurchmesser von 0,5 mm verzogen.

Des Weiteren resultierte aus der interdisziplinären Zusammenarbeit mit dem Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau (Prof. Matthias Reich) und dem Institut für physikalische Chemie (Prof. Florian Mertens) eine gemeinsame Erfindung zu einem neuartigen Bohrhämmer-Antrieb, die zum internationalen Patent angemeldet wurde. Für die Übernahme der zugehörigen Rechte konnte ein mittelständisches Unternehmen in Deutschland gewonnen werden. Die Forschungsarbeiten an dieser neuartigen Maschine sollen mit der Zielsetzung der Präsentation und Erprobung eines feldtauglichen Prototyps im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts weiterbetrieben werden.

Entwicklung und Praxistest neuer Bohrwerkzeuge

Am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau haben Prof. Matthias Reich und Ulf Kirsten die Entwicklung und den Bau eines Kleinkaliberbohrversuchsstands (Abb. 3) zur detaillierten Untersuchung von Gesteinszerstörungs Vorgängen beim Bohren in Festgestein vorangebracht. Das Bohrgerät, das zunächst nur für spanende Gesteinszerstörungsverfahren eingesetzt werden konnte, wurde zu einer multifunktionalen Bohrversuchsanlage ausgebaut, mit der auch neuartige schlagende Verfahren erprobt und untersucht werden können. Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen zum Bohren in Festgestein mit drehenden und schlagenden Verfahren werden namentlich die energetischen und tribologischen Aspekte der Gesteinszerstörungsprozesse in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Heinz Konietzky analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchung werden dazu verwendet, neue Anforderungen an die

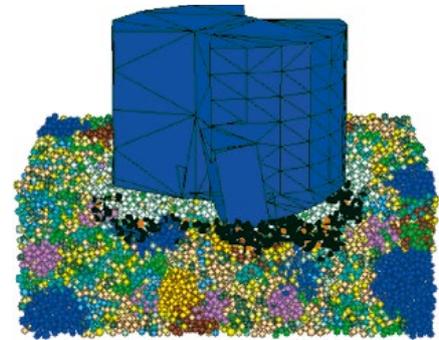


Abb. 3: links: Bohrversuchstand mit Ausrüstung zum spanenden Bohren; rechts oben: Granit-Bohrmuster beim spanenden Bohren von Granit; rechts unten: Simulation des Bohrversuchs durch das Institut für Geotechnik (Prof. Dr. Heinz Konietzky)

durch den Kontakt mit diversen Gesteinsarten auf Verschleiß beanspruchten Materialien zu definieren.

Struktur-Eigenschaft-Korrelationen und Simulationssoftware

Die Entwicklung neuer, maßgeschneiderter Materialien erfordert auch ein Verständnis der Grundlagen zur Klärung der Frage, wie die Struktur, aber auch Defekte die Materialeigenschaften bestimmen und verändern. Eines der wichtigsten Werkzeuge zur Aufhellung dieser Zusammenhänge ist die Röntgenbeugung. Im Institut für Werkstoffwissenschaft (Prof. David Rafaja) wurden grundlegende Fortschritte in der umfassenden Beschreibung der Mikrostruktur von hexagonalem Bornitrid und ihres Einflusses auf den Gang der Umwandlung der hexagonalen BN-Precursoren in die Hochdruckmodifikationen von BN erreicht – durch Auswertung der anisotropen Verbreiterung der Beugungslinien in Röntgendiffraktogrammen. Für

die Umwandlung von defektreichem und defektarmem h-BN wurden, gestützt auf die Kombination von Röntgenbeugung und Transmissionselektronenmikroskopie, Modelle vorgeschlagen, die die jeweilige Phasentransformation auf atomarer/nanoskaliger Ebene beschreiben.

Am Institut für Theoretische Physik (Prof. Jens Kortus) wurde ein Programmpaket zur parameterfreien Vorhersage von Kristallstrukturen bei Normalbedingungen bzw. unter Druck entwickelt. Das Programm bedient sich aus der Biologie entlehnter evolutionärer Strategien und ist für beliebige chemische Zusammensetzungen der Kristalle anwendbar.

Das Paket mit dem Namen EVO wurde der internationalen Wissenschaftsgemeinschaft als OpenSource zur Verfügung gestellt und von mehreren Arbeitsgruppen schon angefragt. Mittels EVO wurden bereits mehrere bisher noch nicht diskutierte neue Phasen theoretisch identifiziert. Ein Beispiel dafür ist eine neue Kohlenstoffstruktur (Abb. 4),

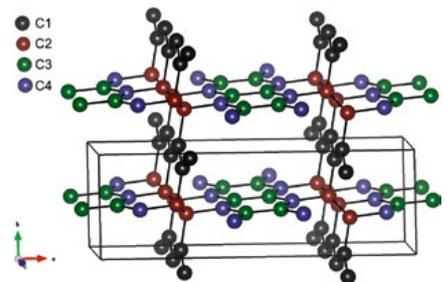


Abb. 4: Gekreuzte Graphenschichten, theoretische Vorhersage einer neuen Form des Kohlenstoffgitters

die aus gekreuzten Graphenschichten besteht und sich durch eine Kombination von sp²- und sp³-Bindungen auszeichnet. Das Programmpaket wird auch genutzt, um zum Beispiel neue Materialien für Li-Ionen-Batterien zu finden.

Einsatz der Hochdruckpresse in Lehre und Nachwuchswerbung

Im Zeitraum 2009 bis 2012 wurden die Studenten aus vier Praktikumsjahren aus dem Studiengang Angewandte Naturwissenschaft mittels spe-

ziell dazu konzipierter Versuche an der Multianvil- und Toroidpresse sowie zur Schockwellensynthese an das Themengebiet „Hochdrucktechnik, Hochdrucksynthese“ herangeführt. Hierbei wurde stets ein Querbezug zur aktuellen Forschung hergestellt.

2009 resultierten hieraus ein Posterbeitrag auf der „International Conference on High Pressure Science and Technology, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50“ in Tokyo, Japan, und eine Veröffentlichung im Journal of Physics über eine neue Methode der Hochdruckkalibration einer Multianvilpresse. Der letzte Prakti-

kumsdurchlauf war dem Thema „Aluminid unter Hochdruck“ gewidmet, das im Rahmen des Projekts ADDE von Interesse ist.

Studierende der beiden letzten Jahrgänge konnten die Methodik und die Ergebnisse ihrer Praktikumsversuche im Rahmen einer öffentlichen Postersession im Chemiegebäude vorstellen, zu der auch Lehrende aus anderen Fachgebieten (Physik, Materialwissenschaft, Mineralogie) eingeladen waren. Diese sehr motivierende Art der Bewertung von Studienleistungen wurde gut aufgenommen.

Darüber hinaus wird im Hochdrucktechnikum unter dem Motto „Diamonds are a girl's best friend“ nunmehr zum zweiten Mal ein Workshop zur Diamantsynthese im Rahmen des Girlsday angeboten, um Schülerinnen als potenzielle Nachwuchskräfte für die Hochdruckforschung zu begeistern.

Danksagung

Die Professoren, Mitarbeiter, Doktoranden und Studenten des FHP danken der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung für die in den vergangenen Jahren erwiesene großzügige Unterstützung. Insbesondere sind wir Frau Erika Krüger und Herrn Lütke-Uhlenbrock für ihr stetes Interesse an unseren Arbeiten verbunden.

Nachhaltigkeitsstrategien in der deutschen Assekuranz

Carolin Steinborn, Jacob Kleinow, Andreas Horsch

Einleitung

Nachhaltigkeit zählt zu den prägenden Begriffen der Gegenwart – und zu den besonderen Herausforderungen für unternehmerisches Handeln. Traditionell eher in der Energie- und Ressourcenwirtschaft verortet, sind Nachhaltigkeitsstrategien heute in Unternehmungen verschiedener Branchen zu finden, darunter auch bei den Finanzintermediären der Kredit- und Versicherungswirtschaft. Der zunehmende Stellenwert der Nachhaltigkeit für die deutsche Assekuranz lässt sich nicht zuletzt daran ablesen, dass dieses Thema inzwischen sowohl vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) als auch von verschiedenen Versicherungsunternehmen (VU) aufgegriffen worden ist. Dies zeigt sich dem (Unternehmens-)Externen primär in Form von Nachhaltigkeitsberichten bzw. am Nachhaltigkeitsbegriff ausgerichteten Geschäftsberichten. Im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit einem öffentlichen VU untersucht der Freiburger Lehrstuhl für Investition und Finanzierung daher Nachhaltigkeitsstrategien in der deutschen Assekuranz vor dem Hintergrund des derzeit zu beobachtenden „Nachhaltigkeitstrends“. [1]

Nachhaltigkeit aus unternehmerischer Sicht

Am Beginn der Analyse steht eine Klärung des Nachhaltigkeitsbegriffs. Ausgangspunkt dafür ist naturgemäß das 1713 durch den sächsischen Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz im Zusammenhang mit der erhal-

tenden Waldbewirtschaftung geprägte Verständnis, wonach nur so viele Bäume gefällt werden sollten, wie im gleichen Zeitraum nachwachsen konnten. [2] Die Kombination des ökonomischen Ziels der maximal möglichen dauerhaften Holzentnahme mit den ökologischen Bedingungen des Nachwachsens (Maximalprinzip) wurde zum Vorbild späterer Nachhaltigkeitsüberlegungen: „*Wird derhalben die größte Kunst / Wissenschaft / Fleiß und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen / wie eine sothane Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen / daß es eine kontinuierliche beständige und nachhaltige Nutzung gebe / weiln es eine unentberliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag.*“ [3]

Die Begriffe *Nachhaltigkeit* und *nachhaltige Entwicklung* werden heute umgangssprachlich häufig synonym verwendet, wenngleich in der Literatur zu meist eine Unterscheidung stattfindet. Nachhaltigkeit wird als erwünschtes Ziel erachtet, wohingegen nachhaltige Entwicklung den Prozess zur Erreichung von dauerhafter Nachhaltigkeit bezeichnet. [4] Die heute am weitesten verbreitete Definition für nachhaltige Entwicklung stammt von der sogenannten Brundtland-Kommission: „*Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*“ [5] Auf der Weltkonferenz für Umwelt und Entwicklung (1992) verpflichteten sich daraufhin 178 Nationen zu einer globalen Partnerschaft mit dem Leitbild einer nachhalti-

gen Entwicklung, wonach menschliches Handeln ökologisch tragfähig, sozial gerecht und wirtschaftlich effizient sein soll. Dies verhalf der Nachhaltigkeitsidee zu wachsender Bekanntheit sowie Bedeutsamkeit und beförderte damit „zukunftsverträgliches Handeln im Hier und Jetzt“ [6] zu einem der zentralen Trends des 21. Jahrhunderts.

Aufbauend auf der vorgestellten Definition hat sich als praktikabler Ansatz für die Umsetzung von Nachhaltigkeit in Institutionen das sog. dreidimensionale Nachhaltigkeitsmodell (Nachhaltigkeitsdreieck, siehe Abb. 1) etabliert, das ökologische Verträglichkeit mit sozialer Gerechtigkeit und wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit kombinieren soll. [7]

Diese drei Zielkategorien sind auch in der Nachhaltigkeitsstrategie einer (Versicherungs-)Unternehmung zu berücksichtigen. Die Darstellung illustriert hierbei nicht nur die Zielpluralität, sondern auch die zwischen den Zielen existierenden Konflikte, die ein angemessenes Ausbalancieren notwendig machen. [8] Tatsächlich ist das für Ent-

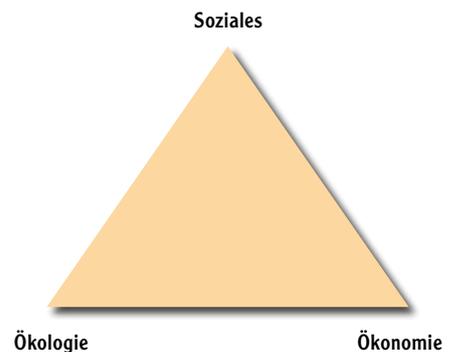


Abb. 1: Das Nachhaltigkeitsdreieck

scheidungssträger in Unternehmen keine grundsätzlich neue Herausforderung: In allen Unternehmen müssen die Entscheidungsträger des Managements die Interessen verschiedener Stakeholder ausbalancieren. In dem Moment, da bestimmte Aspekte – konkret: Nachhaltigkeitserwägungen – für Stakeholder, wie beispielsweise Kunden, Mitarbeiter oder die Öffentlichkeit relevant werden, tut das Management gut daran, sie angemessen zu berücksichtigen. Dieses Handeln ist dabei durchaus unternehmerisch und nicht altruistisch. [9]

Versicherungsunternehmen

VU sind Institutionen, die Finanzintermediation betreiben, indem sie es ihren Vertragspartnern ermöglichen, unsichere gegen „sichere“ (faktisch: weniger unsichere) Zahlungsströme, also gegenwärtige Prämienzahlungen sowie Versicherungszahlungen im Versicherungsfall, zu tauschen. [10] Eine elementare Funktion der VU liegt damit in der Verringerung von Unsicherheiten, die zu erwünschten Erhöhungen der Wagnisbereitschaft von versicherten Akteuren führen kann: Der Versicherungsvertrag gilt als „Institution, die das [unternehmerische] Wagen erleichtert“. [11]

Institutionen, die Versicherungsleistungen anbieten, werden traditionell anhand ihrer versicherungsnehmenden Kontraktpartner unterschieden: Erstversicherer versichern natürliche und versicherungsfremde juristische Personen, Rückversicherer versichern Erstversicherer. Unabhängig von der wirtschaftlichen Bedeutung gerade der inländischen Rückversicherer konzentriert sich die empirische Untersuchung auf Erstversicherer, da Nachhaltigkeitsstrategien aufgrund ihrer Stakeholder-Struktur vor allem hier einen Platz haben. Den mit Abstand größten Anteil am Beitragsaufkommen in der Erstversicherung (Individualversicherung) hat die Lebensversicherung (86,2 Mrd. €), gefolgt von der privaten Krankenversicherung (35,9 Mrd. €) und der Kraftfahrtversicherung (21,6 Mrd. €) (Abb. 2).

Setzt man die Einnahmen mit Umsatzerlösen gleich, rangiert die Assekuranz nach Einzelhandel und dem Maschinenbau auf Platz drei im innerdeutschen Branchenvergleich und ist mit einem Kapitalbestand von 1,2 Bio. € (ca. 45% des deutschen Bruttoinlandsprodukts [13]) der zweitgrößte institutionelle Investor hinter der Kreditwirtschaft. [14]

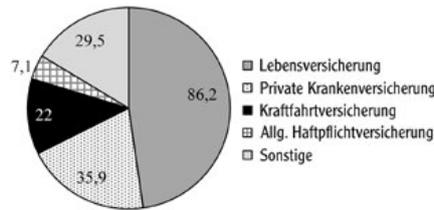


Abb. 2: Versicherungsbranche nach Beitragsaufkommen (in Mrd. €, 2012) [12]

Trotz steigender Beitragsaufkommen ist die Anzahl der durch die Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht (BaFin) beaufsichtigten VU in den vergangenen zwei Dekaden kontinuierlich auf mittlerweile ca. 600 [15] gesunken. Nicht zuletzt steigende regulatorische Anforderungen – wie das neue Rahmenwerk Solvency II – erhöhen den Konsolidierungsdruck, der vor allem auf kleine und mittelgroße VU wirkt. [16] Insofern stehen deutsche Erstversicherer unter erheblichem Transparenz- und Performancedruck, dessen Bewältigung ein angemessenes Ausbalancieren der Ansprüche der verschiedenen Stakeholder erfordert. Die Erzielung einer marktgerechten Eigenkapitalrendite bzw. Wertsteigerung für die Eigenkapitalgeber und einer Überschussbeteiligung für die Versicherten bleibt dabei unverändert zentrales Ziel. Hinzu treten entsprechende Zwischenziele sowie insbesondere widerstreitende Nebenziele, die von den Entscheidungsträgern in den VU verfolgt werden (müssen). In diesem Kontext haben deutsche VU in den letzten Jahren zunehmenden Wert auf (die Kommunikation von) Nachhaltigkeitsstrategien gelegt. Hieraus ergab sich die

Forschungsfrage, welche Erstversicherer hierbei welche Motive bzw. Inhalte zugrunde legen.

Empirische Untersuchung von Nachhaltigkeitsstrategien deutscher VU

Für die erste empirische Untersuchung wurde neben dem auftraggebenden eine Peergroup von 16 VU bestimmt und befragt, die so gewählt wurde, dass trotz der geringen Anzahl von Beobachtungswerten eine repräsentative Stichprobe für die deutsche Assekuranz als Grundgesamtheit erreicht wurde. Abbildung 3 zeigt die befragten VU mitsamt den zentralen Kennzahlen.

Vier VU beteiligten sich trotz mehrmaliger Kontaktaufnahme nicht an der Befragung, sodass sich die Teilnehmerzahl auf zwölf verringerte, was einer Teilnahme-/Rücklaufquote von 75% entspricht. Die teilnehmenden VU befassen sich seit durchschnittlich ca. 8 Jahren (Median: 5 Jahre) mit dem Thema Nachhaltigkeit. Ausschlaggebend dafür, Nachhaltigkeit als Unternehmensziel zu berücksichtigen, waren die folgenden Motive (Abb. 4).

Demnach befassen sich deutsche VU insbesondere mit Blick auf das entsprechende Verantwortungsgefühl von Management/Mitarbeitern mit der Nachhaltigkeitsthematik. Fünf der befragten zwölf VU verfügen bereits über eine ausformulierte unternehmensweite Nachhaltigkeitsstrategie, weitere fünf planen eine solche. Gemessen daran verwundert, dass bislang lediglich zwei (künftig drei) der zwölf VU einen jährlichen Nachhaltigkeitsbericht erstellen.

VU der Peergroup	Gebuchte Brutto-beiträge 2012 in Mrd. €	Jahresüberschuss nach Steuern 2012 in Mio. €	Kapitalanlagebestand 2012 in Mrd. €	Mitarbeiter 2012
Allianz Konzern	72,09	5.491	507,50	144.094
AXA Deutschland	10,47	388	73,40	10.486
Continental Versicherungsverbund	3,00	-24	18,12	3.456
DEVK Versicherungen	2,27	60	8,56	3.511
ERGO	17,09	289	125,39	29.768
Generali Konzern Deutschland	13,80	622	106,93	14.518
HDI Versicherungen	1,40	-87	3,14	2.188
HUK-Coburg Versicherungsgruppe	5,58	381	26,06	9.072
LVM Versicherung	2,81	130	14,58	3.586
Provinzial NordWest	2,99	136	21,14	3.036
Provinzial Rheinland Versicherung AG	2,43	79	16,23	2.586
R+V Versicherung	10,64	324	68,05	14.051
Signal Iduna Gruppe	5,51	76,4 (2011)	41,22	9.150
SV Sparkassenversicherung	2,93	94	21,92	5.049
Versicherungskammer Bayern	6,90	132	40,51	6.789
VGH Versicherungen	1,18	38	12,74	2.583
Zurich Gruppe Deutschland	6,10	-231 (17)	31,57	5.778

Abb. 3: Die Peergroup im Überblick [18]

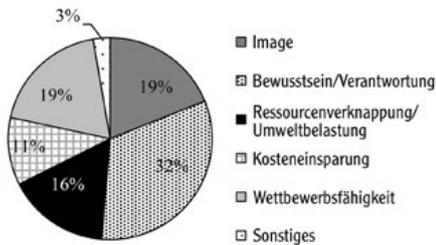


Abb. 4: Motivation der Nachhaltigkeitsstrategie

Bei der Frage nach der hauptsächlichen Zielrichtung der Nachhaltigkeitsstrategien maßen die VU der Peergroup Umweltaspekten ein leichtes Übergewicht zu (Abb. 5).

Fünf der zwölf VU verfolgen alle drei Aspekte, wohingegen sich lediglich zwei VU nur einem Schwerpunkt widmen, obwohl eine solche Fokussierung das Ausschöpfen bestehender Potenziale und vor

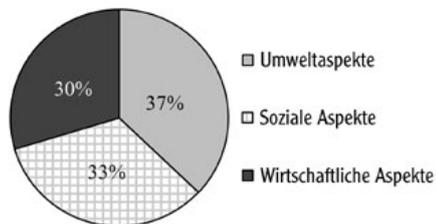


Abb. 5: Ausrichtung der Nachhaltigkeit im Unternehmen

allem die flächendeckende Konsistenz der Nachhaltigkeitsstrategie gefährden kann.

Fünf der zwölf VU haben mindestens eine Stelle mit Nachhaltigkeits-/Umweltbeauftragten besetzt, die für Umsetzung und Kommunikation von Nachhaltigkeitsstrategien zuständig sind. Acht der zwölf befragten VU geben an, bereits gezielt nachhaltig gestaltete Versicherungsverträge in ihr Angebotssortiment aufgenommen zu haben. Mit neun VU gibt die Mehrheit an, im Aktivgeschäft in nachhaltige Kapitalanlagen („Green Investments“) zu investieren. Von ihnen investieren vier VU zudem in nachhaltige Kapitalanlagen im Bereich Soziales. Die Hälfte der VU wirbt für ihre nachhaltigen Produkte gegenüber den Kunden, beispielsweise mithilfe von Plakaten, Broschüren und hauseigenen Veröffentlichungen.

Trotz der überwiegend positiven Aussagen der VU der Peergroup in punkto Nachhaltigkeitsstrategien ist zu bedenken, dass Unternehmen aller Branchen momentan an dem Bekenntnis, glaubwürdig Nachhaltigkeits- oder zumindest Umweltschutzziele zu verfolgen, im Grunde kaum vorbeikommen, da die Sta-

keholder das von ihnen erwarten. Dies verleitet zuweilen dazu, dass Entscheidungsträger ihr Unternehmen durch zahlreiche Projekte gegenüber den Stakeholdern möglichst positiv im Allgemeinen und glaubhaft nachhaltig im Besonderen darzustellen suchen, wofür selbst kleinere Erfolge überdeutlich herausgestellt und Misserfolge verschwiegen werden (sog. „Greenwashing“). [19] Auch die von den VU der Peergroup herausgehobenen Einzelmaßnahmen sind daher hinsichtlich ihres tatsächlichen Nachhaltigkeitseffekts noch kritisch zu hinterfragen.

Ausblick

Die Nachhaltigkeitsthematik ist in der deutschen Assekuranz bereits wesentlich präsenter als vielerorts vermutet. Die Intensität der Beschäftigung mit Nachhaltigkeitskonzepten wird in der Branche tendenziell weiter zunehmen. Hierfür sorgen auch die durch die Krisenprozesse seit 2007 induzierten Entwicklungen: Die Krise hat ökonomische Kalküle zumindest zeitweise in ein schlechtes Licht gerückt. Unabhängig davon, dass (Versicherungs-)Unternehmen gleichwohl aus ihrer Natur heraus einem ökonomischen Oberziel verpflichtet bleiben, erschweren die Folgewirkungen der Krise – wie die (geld-)politisch induzierte Niedrigzinsphase – deren Erreichung, während gleichzeitig der Druck der Stakeholder zunimmt, Nachhaltigkeitserwägungen größeres Gewicht einzuräumen. Für VU stellt sich daher nicht mehr die Frage nach der Notwendigkeit einer Nachhaltigkeitsstrategie, sondern nach deren zielführender Ausgestaltung. Das begonnene Forschungsprojekt wird sich daher im weiteren Verlauf genau diesen Fragestellungen widmen.

Anmerkungen

- 1 Vgl. Focke et al. (2010), S. 591.
- 2 Vgl. Carlowitz (1713), S. 105.
- 3 Carlowitz (1713), S. 105f. (Hervorhebung v. d. Autoren). Zur Bedeutung vgl. Grunwald/Kopfmüller (2012), S. 19.
- 4 Vgl. Voigt (2005), S. 122.
- 5 Brundtland (1987), S. 43.
- 6 Carlowitz/Hamberger (2013), S. 9. Zur Bedeutung vgl. Hauff/Schiffer (2013), S. 9ff.
- 7 Vgl. Hauff/Schiffer (2013), S. 15; Bardt (2012), S. 4.
- 8 Vgl. Bardt (2012), S. 4; Forum Nachhaltige Entwicklung der Deutschen Wirtschaft (2013).
- 9 Vgl. Bundesumweltministerium (1997), S. 2.
- 10 Zurückgehend auf den Nobelpreisträger Kenneth Arrow, vgl. dazu etwa Zweifel/Eisen (2003), S. 3f.
- 11 Sinn (1987), S. 19. Zu den Funktionen der Versicherung vgl. daneben ausführlich die Standardwerke von Farny (2011), S. 8ff.; Zweifel/

Eisen (2003), S. 15ff.; sowie aktuell Nguyen/Romeike (2013) S. 15ff.

- 12 Eigene Darstellung auf Basis von GDV (2012), S. 4.
- 13 Vgl. Statistisches Bundesamt (2013), S. 5.
- 14 Vgl. Wolgast (2011), S. 475ff.
- 15 Vgl. BaFin (2013).
- 16 Vgl. ausführlich und m.w.N. Farny (2011), S. 837ff.; Horsch/Rathmann (2012), S. 177ff.
- 17 Jahresfehlbetrag (Business Operating Profit) nach IFRS.
- 18 Eigene Darstellung auf Basis der Geschäfts-/Nachhaltigkeitsberichte für das Geschäftsjahr 2012.
- 19 Vgl. Rieckens (2010).

Literatur

- BaFin - Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht (2013): Versicherungsunternehmen und Pensionsfonds mit Geschäftstätigkeit per 17.06.2013; www.bafin.de.
- Bardt, Hubertus (2012): Auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit - Erfolge und Herausforderungen 25 Jahre nach dem Brundtland-Bericht, Köln.
- Brundtland, Gro Harlem (1987): Our Common Future, New York.
- Bundesumweltministerium / Verein für Umweltmanagement in Banken, Sparkassen und Versicherungen (1997): Umwelt und Finanzdienstleistungen - Verantwortung für eine nachhaltige, umweltgerechte Entwicklung, München.
- Carlowitz, Hans Carl v. (1713): Sylvicultura oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baumzucht, Leipzig.
- Farny, Dieter (2011): Versicherungsbetriebslehre, 5. Aufl., Karlsruhe.
- Focke, Heinrich / Engler, Karsten / Baldeweg, Ralf / Thiele, Jürgen (2010): Zielgruppe Lohas: Durch Nachhaltigkeit Wachstumspotenziale erschließen, in: Versicherungswirtschaft, 65. Jg., S. 591-592.
- Forum Nachhaltige Entwicklung der Deutschen Wirtschaft (2013): Positionen und Ziele, online unter: <http://www.econsense.de/de/ueber-econsense/positionen-und-ziele>, 22.08.2013.
- GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2012): Jahrbuch 2012 - Die deutsche Versicherungswirtschaft, Berlin.
- Grunwald, Armin / Kopfmüller, Jürgen (2012): Nachhaltigkeit, 2. Aufl., Frankfurt/M.
- Hauff, Michael v. / Schiffer, Helena (2013): Anforderungen des Paradigmas nachhaltiger Entwicklung, in: Hauff, Michael v. / Nguyen, Thuan (Hrsg.): Nachhaltige Wirtschaftspolitik, Baden-Baden, S. 9-31.
- Horsch, Andreas / Rathmann, Tanja (2012): Kreditrisikotransfer durch Kreditversicherung, Karlsruhe.
- Nguyen, Tristan / Romeike, Frank (2013): Versicherungswirtschaftslehre - Grundlagen für Studium und Praxis, Wiesbaden.
- Rieckens, Christian (2010): Mehr Schein als Sein, in: Manager Magazin, 9/2010, S. 71-75.
- Sinn, Hans-Werner (1987): Gedanken zur volkswirtschaftlichen Bedeutung des Versicherungswesens, Discussion Paper 87-15, Volkswirtschaftliche Fakultät LMU München, München.
- Statistisches Bundesamt (2013): Bruttoinlandsprodukt 2012 für Deutschland, Wiesbaden.
- Voigt, Christina (2005): From Climate Change to Sustainability: An Essay on Sustainable Development, Legal and Ethical Choices, in: Worldviews: Environment, Culture, Religion, Bd. 9, Nr. 1, S. 112-137.
- Wolgast, Michael (2011): Theorie trifft Praxis - Versicherungswirtschaft, in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium 40. Jg., S. 474-478.
- Zweifel, Peter / Eisen, Roland (2003): Versicherungsökonomie, 2. Aufl., Berlin.



Erzberg in der Region Eisenerz

GERALD SEMARCLENS DE GRANCY

Das Kulturerbe als Mittel zur Förderung des wirtschaftlichen und sozialen Wandels in alt-industriellen Regionen:

Das EU-Projekt SHIFT-X



Daniela Walther¹

Das internationale Forschungsprojekt SHIFT-X beschäftigt sich mit dem Problem der Inwertsetzung industrieller Denkmalstandorte im Hinblick auf die erwünschte nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung einer Region.

Dabei wird deutlich, dass es sich hierbei nicht um ein rein denkmalpflegerisches, sondern um ein ökonomisch orientiertes Verbundprojekt zur Regionalentwicklung handelt, das den Forschungsgegenstand Industriedenkmal unter einem neuen Aspekt beleuchtet. Die jeweiligen Projektpartner, die repräsentativ für die industrielle Entwicklung ihres Landes stehen, sind dabei mit untereinander ähnlichen Herausforderungen konfrontiert: Alt-industrielle Regionen waren über lange Zeit die nationalen Zentren der wirtschaftlichen Entwicklung Mitteleuropas. Auf Grund des durch die politische Wende 1990 herbeigeführten wirtschaftlichen Wandels von der Planwirtschaft hin zur Marktwirtschaft und der Einflüsse der Globalisierung verloren diese Regionen ihre wirtschaftliche Bedeutung. Vor allem peripher gelegene Gebiete mit klein- und mittelgroßen Stadtstrukturen haben oft nur ihre industrielle Vergangenheit und ein materielles und immaterielles Kulturerbe vorzuweisen – als Potenzial

für eine zukünftige wirtschaftliche Entwicklung. Dies ist ein klarer Nachteil gegenüber Metropolregionen, die ungleich leichter Zugang zu finanziellen Mitteln und kreativem Know-how für den Strukturwandel finden.

Die bisherige Erfahrung zeigt, dass der Wert industriekulturell wichtiger Orte und Landschaften oft erst verzögert wahrgenommen wird. Die oftmals verwahrlosten Relikte werden entweder zügig als schmutzige Symbole einer niedergegangenen industriellen Vergangenheit beseitigt oder verkümmern gänzlich. Die Erhaltung dieser Objekte wird meist in einem wenig innovativen musealen Kontext betrieben, der ihr wirtschaftliches Nutzungspotenzial nur unzureichend widerspiegelt. Aber frühere industrielle Prosperität hat in der Regel eine ausgeprägte regionale Leitkultur und Verbundenheit erzeugt und hinterlassen, deren Wirkung auch nach dem Niedergang der dominierenden Industriebranchen verbleibt und gelebt wird. Allerdings ist die Außenwahrnehmung altindustrieller Regionen hinsichtlich der Lebens- und Arbeitsqualität in der Regel eher negativ besetzt. Die Folgen treten i. d. R. deutlich in Form von sozialen Problemen, wie Arbeitslosigkeit und Abwanderung vor allem junger und gut ausgebildeter Menschen zu Tage. Notwendige öffentliche oder private In-

vestitionen unterbleiben. Ein kultureller Wandel im Sinne einer Neuinterpretation der vorhandenen – auch baulichen – Werte und einer Verbesserung des regionalen Images nach innen und außen ist eine wesentliche Voraussetzung für jede weiterführende, nachhaltige Entwicklung in strukturell benachteiligten Regionen. Bereits vorzeigbare Positivbeispiele, z. B. die Region Limburg in Belgien (Steinkohlenbergbau) oder die Region Lausitz (Braunkohlenbergbau) machen deutlich, dass die Startung einer post-industriellen Entwicklung zwar einen hohen Aufwand verursacht, aber bei Offenheit für die anstehenden Probleme und einem innovativen kulturellen Umfeld mit Hilfe von kleineren Bottom-up-Wirtschaftsinitiativen durchaus gelingen kann.

Das Projekt SHIFT-X stellt sich eben dieser systemischen Herausforderung. Dafür haben sich sechs post-industrielle Städte und Regionen zusammengetan, die teilweise bereits Erfahrungen auf diesem Feld sammeln konnten. Gemeinsam mit zwei Wissenschaftspartnern aus dem Bereich der Regionalentwicklung, des Industriedenkmalsschutzes und der systemischen Innovationsforschung sollen Vorbildlösungen entwickelt, getestet und europaweit verbreitet werden, die aufzeigen, wie industrielles Kulturerbe zukunftsorientiert eingesetzt werden kann, um nachhaltige, endogene Entwicklungen anzustoßen, Innovation in relevanten Wirtschaftszweigen zu initiieren, regionale Identitäten zu stärken und so den Imagewandel zu fördern. Dadurch sollte der regional notwendige soziale und wirtschaftliche Strukturwandel vorangebracht werden, um die Wettbewerbsfähigkeit und die Attraktivität solcher Regionen nachhaltig und langfristig zu verbessern.

Regionale Partner

Leadpartner

- Landkreis Zwickau für die Wirtschaftsregion Chemnitz-Zwickau mit ihrer Automobil-, Textil-, Maschinenbau- und Bergbaugeschichte (DE)
- Bergbautourismusverein Welzow für die Niederlausitz mit ihrer Bergbaugeschichte (DE)
- Verein Steirische Eisenstraße für die Region Eisenerz mit ihrer Geschichte des Bergbaus und der Stahlproduktion (AT)
- Mikroregion Sokolov-Ost für Nordwest-Böhmen mit seiner Geschichte

¹ Dr. Daniela Walther, TU Bergakademie Freiberg, Inst. für Industriearchäologie, Wissenschafts- und Technikgeschichte, www.shiftx.eu

des Bergbaus, der Porzellanproduktion, des Maschinenbaus und der chemischen Industrie (CZ)

- STEBO Competence Center for Community Development für die Region Limburg mit ihrer Bergbaugeschichte (BE)
- Stadt Bydgoszcz mit ihrer Geschichte der chemischen Industrie, des Maschinen- und Eisenbahnbaus (PL)

Über ein Tandem-Support-System interagieren die Regionen intensiv und können durch Erfahrungsaustausch voneinander lernen und profitieren und bessere Managementstrukturen im Denkmalbereich etablieren und somit industrielles Erbe erhalten und als „weichen“ Standortfaktor für die Wirtschaft nutzen.

Wissenschaftliche Partner

- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Industriearchäologie, Wissenschafts- und Technikgeschichte (DE)
- Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Institut für Systemwissenschaften, Innovation und Nachhaltigkeitsforschung (AT)

Im Ergebnis und im Bezug zum industriellen Erbe werden neben Managementkonzepten und Imagekampagnen für die Regionalpartner auch Aktionspläne für die Produktinnovation und Tourenangebote sowie wissenschaftliche Kompendien zu neuen Managementansätzen im Denkmalbereich entstehen. Weiterhin wird in Zusammenarbeit mit der Europäischen Route der Industriekultur ERIH eine gemeinsame europäische Strategie zur Förderung dieser Kultur entwickelt.

Das Projekt SHIFT-X ist international aufgestellt und auf bestehende nationale und europaweite Entwicklungs- und Kulturkonzepte abgestimmt, wie u. a. auf die europäische Kohäsionspolitik und „Europa 2020“ oder auf das BRD-Programm „Aufbau Ost“ und die Leipziger Charta für nachhaltige Stadtentwicklung. Die Umsetzung der Projektergebnisse in den jeweiligen Regionen wird durch dauerhafte Kooperation mit Entscheidungsträgern aus Wirtschaft und Politik sichergestellt, womit die Praxisorientiertheit des Projektansatzes belegt wird.

Rahmendaten des Projekts

- **Laufzeit:** Oktober 2012 – Dezember 2014
- **Förderprogramm:** Europäische Territoriale Kooperation, Programmraum Mitteleuropa (EFRE-Fonds, Ziel 3 = INTERREG IVB)
- **Budget:** Gesamtprojekt 1.751.652,92 Euro, davon Technische Universität Bergakademie Freiberg 121.566,14 Euro



©SHIFT-X
Schaufelradbagger im Tagebau Welzow



©SHIFT-X
©JONNY VEKENANS
Kohlewäsche Beringen in Limburg



©SHIFT-X
©PETER CÜRLIS, Bundesarchiv, 183-R88427/C-C-BY-SA
Zwickau, Schacht Brückenberg I, 1948



©SHIFT-X
©ADRIAN URBANOWICZ
Ehemaliger Mühlenkomplex in Bydgoszcz



©SHIFT-X
©DANIELA WALTHER
Bergwerksgebiet Jiří/Sokolov

Aus dem Protokoll der Jahresmitgliederversammlung 2012

Begrüßung

Der Vorsitzende des Vereins, Prof. Klaus-Dieter Barbknecht, begrüßte die Teilnehmer zur Jahresmitgliederversammlung und dankte für das zahlreiche Erscheinen. Im Gedenken an die verstorbenen Vereinsmitglieder erhoben sich die Anwesenden zu einer Schweigeminute. Der Vorsitzende begrüßte dann insbesondere den Ehrenvorsitzenden, Prof. Holst, und den Rektor der TU Bergakademie Freiberg, Prof. Meyer, informierte kurz über Aktivitäten bezüglich der Gewinnung neuer, junger Mitglieder. Für junge Neuzugänge im VFF hat der Vorstand das „Forum Junge Mitglieder“ ins Leben gerufen und mit der Einladung zu einem ersten Treffen mit den Junioren in die Aula der TU – im Anschluss an die Mitgliederversammlung – gebeten. Im Laufe des Jahres 2013 sollten sich Studenten und junge Mitglieder in mehreren Abendveranstaltungen über für sie bzw. den Verein aktuelle Themen informieren und diese diskutieren. Besonders hervorgehoben wurde die Alumni-Arbeit – dabei u. a., dass in einem ersten Schritt eine ALUMNI-Datenbank aufzubauen und in einem zweiten ein Fünfjahresvertrag zwischen dem VFF und dem Rektorat abzuschließen war – zur personellen Absicherung der ALUMNI-Arbeit. Geplant sind eine Vollzeitstelle und eine halbe Stelle im Sekretariat, die von der TU finanziert werden. Ein Vorstandsmitglied wird mit der Betreuung der Alumni-Arbeit beauftragt. Prof. Barbknecht würdigte die Arbeit von Prof. Roewer, Frau Gelius, Prof. Seidelmann und Frau Meister sowie des Redaktionskollegiums für die wiederum hervorragende Ausgabe der Zeitschrift des VFF und der TU „ACAMONTA“ und dankte dem Geschäftsführer Prof. Kretzschmar für seine umfangreiche und innovative Arbeit für den Verein.

Jahresbericht des Vorstands

Die Mitgliederzahl des Vereins beläuft sich zurzeit auf 1078 persönliche und 109 juristische Mitglieder. 32 neue persönliche und vier juristische Mitglieder wurden aufgenommen, und es gab

21 Austritte und sieben Todesfälle. Der Geschäftsführer informierte über die erfolgreiche Lampadius-Festveranstaltung „200 Jahre Gastechnik in Freiberg“ mit der Installation einer historischen Gaslaterne am Gebäude Obermarkt 12 (Carlowitz-Haus) sowie der Einweihung des Lampadius-Denkmal auf dem Freiburger Gelehrtenweg am 19. Juni 2012. Er lenkte die Aufmerksamkeit auch auf die vom VFF unterstützte Ausstellung von Zeichnungen und Aquarellen von Dr. Peter Czolbe im Schloss, die unter der Ägide des Bergarchivs historische Anlagen des Bergbaus im Freiburger Revier zeigt. Prof. Kretzschmar informierte über ausgewählte zukünftige Förderprojekte, wobei die ALUMNI-Arbeit zu forcieren ist. Der Geschäftsführer bedankte sich abschließend besonders bei Frau Meister für ihre umsichtige Arbeit im Sekretariat des Vereins sowie bei allen Mitgliedern für die Treue zum VFF. Als Termin für die nächste Jahresmitgliederversammlung wurde der 29. November 2013 festgelegt. Der Bericht des Rechnungsprüfers wurde von Herrn Knoll vorgetragen. Die Finanzprüfung wurde durch den Wirtschaftsprüfer, Dr. Haase, bereits im September 2012 vorgenommen. Es gab keine Beanstandungen entsprechend den Grundsätzen für das Jahr 2011. Der Rechnungsprüfer empfahl die Entlastung des Vorstands für das Geschäftsjahr 2011.

Diskussion zum Jahresbericht und Entlastung des Vorstands zum Etat 2011, Beschluss des Etats 2013

Der Jahresbericht 2011 und der Etat-Entwurf für das Geschäftsjahr 2013 wurden ohne Diskussionsmeldungen verabschiedet. Dem Antrag auf Entlastung des Vorstands für das Geschäftsjahr 2011 wurde einstimmig zugestimmt.

Auszeichnungen und Ehrungen

Zur Auszeichnung mit dem Cotta-Preis wurden elf Diplomarbeiten und fünf Dissertationen vorgeschlagen. Die vom Verein gestifteten Bernhard-von-Cotta-Preise erhielten in der

- Kategorie I, Dissertationen (grundlagenorientiert): Dr. rer. nat. Dirk Tischler, für seine Arbeit „Styrene Monooxygenases of *Rhodococcus opacus* 1CP“, Preisgeld: 2.000 €.
- Kategorie II, Diplomarbeiten (grundlagenorientiert): Dipl.-Math. Melanie Nentwich, für ihre Arbeit „Strukturbestimmung von ausgewählten Selten-

erdverbindungen unter Nutzung der DASF-Methode“, Preisgeld: 1.000 €.

- Kategorie II, Diplomarbeiten (anwendungsorientiert): M.Sc. Markus Wagner, für seine Arbeit „Simulation des Verformungsverhaltens laserfestigter Karosseriestrukturen“, Preisgeld: 1.000 €.

Alle Preisträger stellten in kurzen, interessanten Vorträgen die Ergebnisse ihrer Arbeiten vor. Der VFF ehrte auch auf dieser Mitgliederversammlung Persönlichkeiten, die auf „50 Jahre Promotion“ zurückblicken konnten. Die Jubilare waren Prof. W. Förster, Prof. K.-D. Bilkenroth und Dr. L. Hiersemann.

Informationsvortrag des Rektors zur Entwicklung der Universität

Magnifizenz Prof. Meyer erläuterte die Entwicklung der TU Bergakademie Freiberg als Universität der nachhaltigen Stoff-, Energie- und Ressourcenwirtschaft. Abschließend stellte der Rektor den Vereinsmitgliedern einen Stifterbrief „250 Jahre TU Bergakademie Freiberg“ vor – mit der Bitte um rege Beteiligung an der Stiftung.

Festvortrag von Dr. Uwe Richter, Stadtentwicklungsamt, Untere Denkmalschutzbehörde # zum Thema „850 Jahre Freiberg“

Dr. Richter gab einen hochinteressanten Überblick über die Entwicklung des Freiburger Gebiets und der Stadt Freiberg im Zusammenhang mit der historischen Bergbauentwicklung. Er berichtete interessant auch über die wirtschaftlichen Höhen und Tiefen im Bergbau und in Freiberg selbst. Der Vorstandsvorsitzende und der Geschäftsführer dankten Dr. Richter für den kompetenten und sehr interessanten Vortrag.

Abendliche Barbarafeier

Die Vereinsmitglieder und ihre Begleitung feierten im Festsaal der Alten Mensa bei frohen Begegnungs- und Gesprächsrunden das Fest der Heiligen Barbara. Die Verleihung des „Ehrenschleders“ an Frau Dr. Wilde und Herrn Dr. Goedecke durch den Rektor und den Vorstandsvorsitzenden gehörte zu den Höhepunkten des Abends. Ein unterhaltsamer, in Reimform gefasster Vortrag von Thomas Schmalz in seiner Rolle als Freiburger Laternenanzünder Hans würdigte das Leben von Lampadius und dessen Wirken in Freiberg, untermauert durch kurze Szenen mit dem sächsi-

schen „Kurfürstenpaar“ sowie „Frau und Herrn Lampadius“. Das Ensemble erhielt viel Beifall. Ein „Bergmannsschmaus“ sowie die abendliche Bergmusik mit dem Musikkorps Saxonia Freiberg und der Gesang des Steigerlieds rundeten den Abend ab.

Wesentliche Vereinsaktivitäten im laufenden Jahr 2013

Mitgliederstand

Tabelle 1 benennt die neuere Mitgliederbewegung. Der VFF hat gegenwärtig 1110 persönliche und 106 juristische Mitglieder, insgesamt 1216. Wir bewegen uns also seit Jahren auf einem Mitglieder-Plateau. Den 59 Eintritten seit der vorigen Mitgliederversammlung stehen 20 Austritte, drei Streichungen wegen unbekanntem Verzugs und zehn Todesfälle gegenüber. Die Geschäftsführung bittet alle Mitglieder um werbende Ansprache im eigenen Kollegenkreis.

Tab. 1: Mitgliederbewegung 2012/2013

Mitgliederbestand (Stichtag)	2012 (01.09.2012)	2013 (01.09.2013)
Gesamtmitgliederzahl	1.190	1.216
persönliche	1.080	1.110
juristische	110	106
Eintritte		
– persönliche	30	58
– juristische	1	1
Austritte		
– persönliche	12	15
– juristische	1	5
– Streichungen (unbekannt Verzogene)	10	3
– Verstorbene	4	10

Unser Durchschnittsalter beträgt 58 Jahre. Zwei Drittel der Mitglieder sind über 50 Jahre, 5 % sind Studierende. Diese Altersstruktur entspricht dem Freundes- und Förderercharakter unseres Vereins, wenngleich Verjüngungswünsche immer bestehen. Durch eine planvolle Intensivierung der ALUMNI-Tätigkeit des Vereins und im Auftrag des Rektorats beabsichtigt die Geschäftsführung, stärker junge Absolventen für eine Vereinsmitgliedschaft zu gewinnen.

Finanzen

Die solide Finanzsituation des VFF belegt Tabelle 2 zum aktuellen Einnahmen-Ausgaben-Stand im laufenden Jahr im Vergleich zum Vorjahr. Die Einnahmen und Ausgaben des VFF bewegen sich auf Vorjahresniveau. Dankbar sind wir den Spendern für deren zusätzliche Beiträge.

Die Einnahme-Position „Sonstiges“ wird dominiert von den Personalkosten für die Stellen der ALUMNI-Bauftragten, die im TU BAF-Auftrag in die VFF-Geschäftsstelle integriert sind. Etwa zwei Drittel der Vereinsausgaben (ohne die TUBA-Zweckprojekte) gehen direkt in die Förderung der TU Bergakademie (Pos. TUBA-Förderung und ALUMNI), ein Drittel wird für die Geschäftsstelle, für Publikationen und für unsere Jahresveranstaltung benötigt.

Tab. 2: Finanzüberblick 2012 und 2013

2012 Ist (Gesamt)	Positionen	2013 Ist (01.09.13)
423.858	Einnahmen (€)	284.208
53.912	Mitgliedsbeiträge	57.205
12.129	Spenden	8.836
34.287	Sonstiges (incl. ALUMNI)	28.757
323.530	TUBA-Zweckprojekte	189.410
325.973	Ausgaben (€)	185.026
19.914	Geschäftsstelle	12.535
38.629	TUBA-Förderung	16.785
17.139	Publikationen	2.250
5.859	Veranstaltungen	136
23.254	Sonstiges (incl. ALUMNI)	9.086
221.178	TUBA-Zweckprojekte	144.234

Außer diesem Vereinshaushalt verwaltet der VFF noch Zweckprojekte für Forschung, Bildung und Begegnungen an der TU Bergakademie mit einem jährlichen Budget zwischen 200 bis 300 T€. Neun Förderkreise einzelner Institute bzw. Fachrichtungen pflegen die Kontakte. Elf termingebundene Zweckprojekte F/E und Ausbildung werden betreut. Die Rücklagen des Vereins schwanken um 60 T€ über das Jahr. Eine Rückstellung von 40 T€ wurde gebildet, um zur 250-Jahr-Feier der TU Bergakademie im Jahr 2015 eine lebensgroße Metallfigur der Heiligen Barbara für den Eingangsbereich des TU-Hauptgebäudes zu präsentieren. Dank der Beiträge und Spenden der Mitglieder steht der Verein auch im Jahr 2013 auf stabiler finanzieller Basis in Kontinuität zu den Vorjahren.

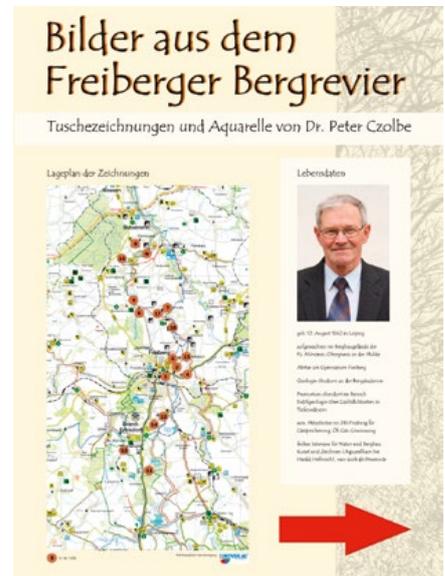
Publikationen

Die jährliche VFF-Hauptpublikation ist die Vereinszeitschrift für jedes Mitglied, die gemeinsam mit der TU Bergakademie herausgegeben wird. Dem Redaktionsteam ist wie stets sehr zu danken für die dahinter verborgene umfangreiche Arbeit.

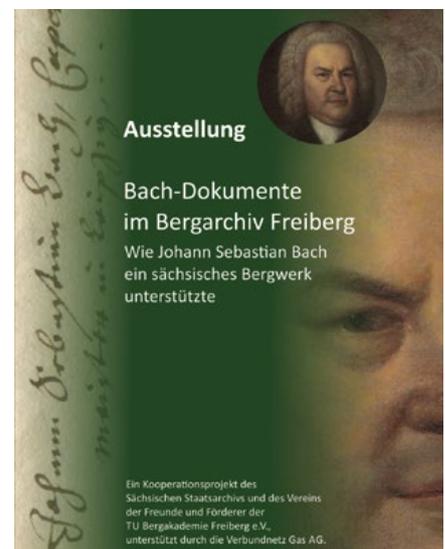
Die Publikationstätigkeit erstreckte sich im Jahr 2013 auch auf die gemeinsame Gestaltung von zwei Bilderausstellungen

gemeinsam mit dem Bergarchiv Freiberg im Schloss Freudenstein:

- Tuschezeichnungen unseres Vereinsmitglieds Dr. Peter Czolbe zu Montananlagen im Freiburger Revier, kombiniert mit historischen Dokumenten aus dem Bergarchiv



- Johann Sebastian Bach und der Freiburger Bergbau. Ausstellung von E. Spree, gesponsert von der VNG-Verbundnetz Gas AG



Der Verein organisiert gegenwärtig gemeinsam mit der TU Bergakademie eine mediengerechte Stadtführung „Freiberger Gelehrtenweg“ entlang der Denkmale und einiger Stadthäuser, in denen einst namhafte Gelehrte wohnten und wirkten. Damit soll Studenten und wissenschaftlich interessierten Touristen ein Gang durch die Freiburger Altstadt mit entsprechenden Informationen angeboten werden, die als Stadtführungen per Print, Autoguide und App verfügbar sind bzw. sein werden.

Alumni-Beauftragte stärkt den Kontakt der Absolventen zu ihrer Alma Mater

Seit dem 1. Juli 2013 gibt es mit Stefanie Preißler an der TU Bergakademie Freiberg eine neue Alumni-Beauftragte, die es sich zum Ziel gesetzt hat, den Zusammenhalt und die Bindung zwischen ehemaligen Studierenden, Doktoranden und Mitarbeitern aus dem In- und Ausland zu „ihrer“ Bergakademie auszubauen und zu festigen. Diese Bindung ist ein zentrales Element für die Zukunft der Hochschule.



Die strukturierte Beziehungsarbeit zwischen einer Universität und ihren Absolventen ist inzwischen aus der deutschen Hochschullandschaft nicht mehr wegzudenken. Alumni können nach einem als erfolgreich und positiv erlebten Studium viel zurückgeben – sei es als Botschafter der TU Bergakademie Freiberg im In- und Ausland, als Vorbild, Mentor oder Ratgeber für Studierende, als Stifter und Spender oder als Vermittler von Wissen aus der Praxis. Der Ausbau dieser Beziehungen ist ein langfristiger und dauerhafter Prozess, der auf der konstanten Kontaktpflege zu den Ehemaligen beruht.

Mit dem Ausbau des Freiburger Alumni-Netzwerks FAN (www.alumni.tu-freiberg.de) können Absolventen zukünftig verstärkt soziale Kontakte zu ihrer Hochschule und ihren früheren Kommilitonen pflegen und ausbauen, aktuelle Neuigkeiten und Entwicklungen erfahren sowie Weiterbildungsangebote nutzen. Die Angebote richten sich ebenso an Studierende, denn erfolgreiche Alumni-Arbeit beginnt bereits mit dem ersten Studientag.

Mit der neuen Mitarbeiterin hat die Universität über den Verein Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V. nun eine Alumna mit dieser strategisch wichtigen Aufgabe betraut. Stefanie Preißler absolvierte den Diplom-Studiengang Industriearchäologie und promovierte zur Geschichte der Bergakademie Freiberg in der Weimarer Republik. Sie kennt die Hochschule als Studierende, wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin und wird dieses Vertrautsein und die Bindung an die TU Bergakademie Freiberg in ihre zukünftige Arbeit einfließen lassen.

Bernhard-von-Cotta-Preis 2012: Die Styrol-Monooxygenase von *Rhodococcus opacus* 1CP – Ein neuer Typ von Flavin-Monooxygenasen mit Potenzial für die Weiße Biotechnologie Dirk Tischler¹

Motivation und Hintergrund

Die Nachfrage mehrerer chemischer Industriezweige nach optisch aktiven Verbindungen ist in den letzten Jahren enorm gestiegen. Diese dienen häufig als Bausteine für Pharmazeutika oder sind selbst schon Wirkstoffe. Es ist jedoch oft schwierig, mit konventionellen chemischen Katalysatoren Produkte selektiv herzustellen. Hier kommen die Enzyme als natürliche (Bio-)Katalysatoren mit hoher Selektivität ins Spiel. Sie können als isolierte oder als Ganzzell-Präparate eingesetzt werden und erlauben häufig Synthesen unter milden Bedingungen (pH- neutral, Raumtemperatur, in wässrigen Systemen). Sie eröffnen somit eine ökologisch interessante Alternative zu chemischen Verfahren.

Enzyme haben oft eine inhärente Enantioselektivität, sodass optisch aktive Verbindungen in hoher Reinheit erzeugt werden können. Im Rahmen meiner Promotion untersuchte ich die Enzym-Klasse Styrol-Monooxygenasen (SMO).

Monooxygenasen sind Enzyme, die hochselektiv organische Verbindungen oxidieren, indem sie Luftsauerstoff aktivieren und eines der beiden Sauerstoffatome auf ein organisches Substrat übertragen. Das zweite Sauerstoffatom wird zum Oxidion reduziert, das über die Wechselwirkung mit Protonen Wasser bildet. Die hohe Selektivität dieser Prozesse liefert die Basis für die Herstellung zahlreicher Pharmazeutika. Konventionell katalysierte chemische Prozesse erfüllen diesen Selektivitätsanspruch oft nicht.

Die Styrol-Monooxygenasen bestehen typischerweise aus zwei Enzymen: einer Reduktase (StyB) und einer Epoxidase-Komponente (StyA) (Abb. 1). Die Reduktase katalysiert die Reduktion von FAD (Flavinadenindinukleotid) durch NADH (Nicotinamidadenindinukleotid). Das reduzierte FAD wird dann von der Epoxidase genutzt, um das Sauerstoffmolekül zu aktivieren und ein O-Atom auf ein Substrat (z. B. Styrol) zu übertragen.

¹ Dr. Dirk Tischler, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften, AG Umweltmikrobiologie, Dirk.Tischler@ioez.tu-freiberg.de

Das Substrat Styrol kann so selektiv zu (S)-Styroloxid epoxidiert werden, woraus sich zum Beispiel Medikamente mit stimulierender Wirkung auf das Immunsystem herstellen lassen.

Die Forschungsarbeit im Rahmen meiner Dissertation führte zur Beschreibung einer neuen Klasse dieser interessanten Biokatalysatoren. In ihnen liegen beide Komponenten fusioniert zu einem Protein vor.

Ergebnisse

Im Gram-positiven Actinobakterium *Rhodococcus opacus* 1CP wurde eine neuartige Styrol-Monooxygenase identifiziert (Abb. 1). Diese besteht aus einer einzelnen Epoxidase (StyA1) und einem Fusionsprotein (StyA2B), eine natürliche Fusion aus Reduktase und Epoxidase. Sie sollte alle Teilreaktionen einer gewöhnlichen Zweikomponenten-SMO (StyA und StyB) katalysieren. Diese neue SMO wurde im Rahmen der Arbeit hinsichtlich ihrer biochemischen Eigenschaften charakterisiert. Zu beantworten war auch die Frage, ob sie eine Rolle beim Abbau von Styrol durch *Rhodococcus opacus* 1CP spielt (Abb. 2).

In der Tat konnte gezeigt werden, dass es sich bei dem Fusionsprotein StyA2B um eine funktionsfähige Styrol-Monooxygenase handelt [Tischler et al. 2009]. Diese ist zunächst unabhängig und kann selbstständig die Reduktase- und Epoxidase-Reaktion ausführen. Zudem erlaubt diese SMO eine enantioselective Umsetzung von Styrol zu (S)-Styroloxid. Für ein tieferes Verständnis des Reaktivitätsmusters wurden das Temperaturoptimum des Prozesses, pH-Effekte, potenzielle Inhibitoren und das Substratspektrum (substituierte Styrol-Derivate) ermittelt. Damit wurde erstmals eine unabhängige Einkomponenten-SMO umfassend biochemisch charakterisiert. Wir haben gezeigt, dass die einzelne Epoxidase StyA1 die erwartete Aktivität hat und sogar mit dem Fusionsprotein zusammenwirkt (Abb. 1) [Tischler et al. 2010]. Auch dieses Enzym wurde eingehend analysiert. Interessanterweise scheint die Kombination der beiden Proteine, StyA1 und

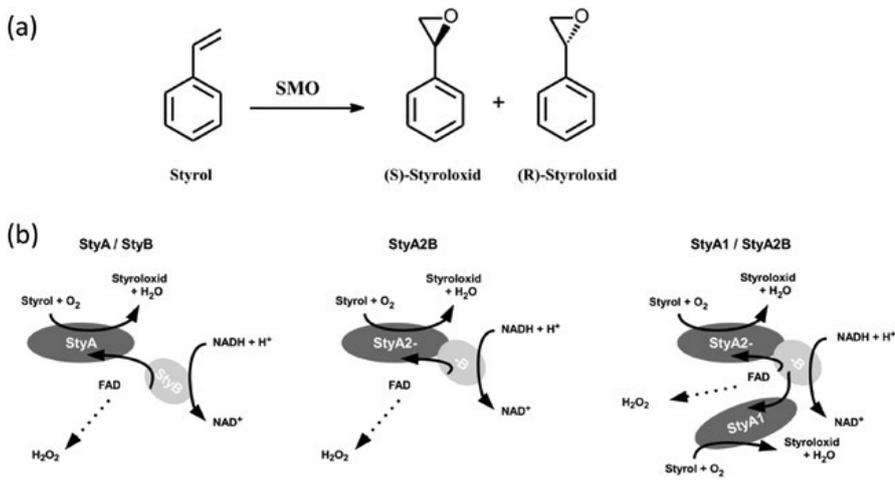


Abb. 1: (a) Der Umsatz von Styrol durch Styrol-Monooxygenasen (SMO) zu viel (S)-Styroloxid und wenig (R)-Styroloxid. Typischerweise können bis zu 98% (S)-Styroloxid gebildet werden. (b) Links [Tischler et al. 2010]: eine herkömmliche SMO aus zwei Komponenten, wobei die Reduktase StyB NADH verbraucht, um FAD zu reduzieren. Dieses wird dann von der Epoxidase StyA genutzt, um den Sauerstoff auf das Styrol zu übertragen. Beim Transfer von FAD zwischen Reduktase und Epoxidase kann es zur Entkopplung kommen, wodurch Wasserstoffperoxid gebildet wird. Diese Reaktion minimiert die Ausbeute bzw. Effizienz (b). Mitte: Die neuartige Einkomponenten SMO StyA2B führt die gleichen Reaktionen aus. Beide Komponenten liegen aber in einem Protein fusioniert vor. Rechts: Das effizienteste System aus StyA1 und StyA2B nutzt reduziertes FAD von StyA2B für die Epoxidation von Styrol. Eine Entkopplung tritt nur selten auf.

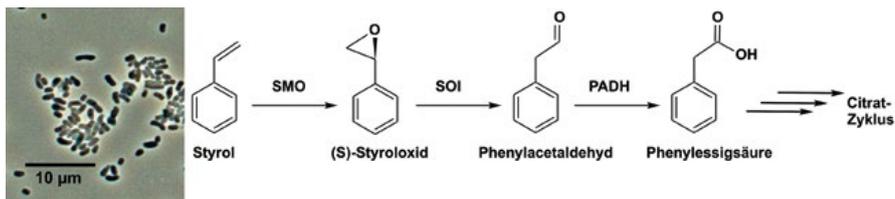


Abb. 2: Links: Eine lichtmikroskopische Aufnahme von *Rhodococcus opacus* 1CP während der Kultivierung auf Styrol als einziger Kohlenstoff- und Energiequelle. Rechts: Der einleitende Abbauweg von Styrol über Styroloxid, Phenylacetaldehyd zu Phenyllessigsäure wird von den Enzymen Styrol-Monooxygenase (SMO), Styroloxid-Isomerase (SOI) und Phenylacetaldehyd-Dehydrogenase (PADH) katalysiert. Die Phenyllessigsäure verkörpert einen zentralen Metaboliten bei Bakterien und kann weiter in Bausteine des Citratzyklus zerlegt werden.

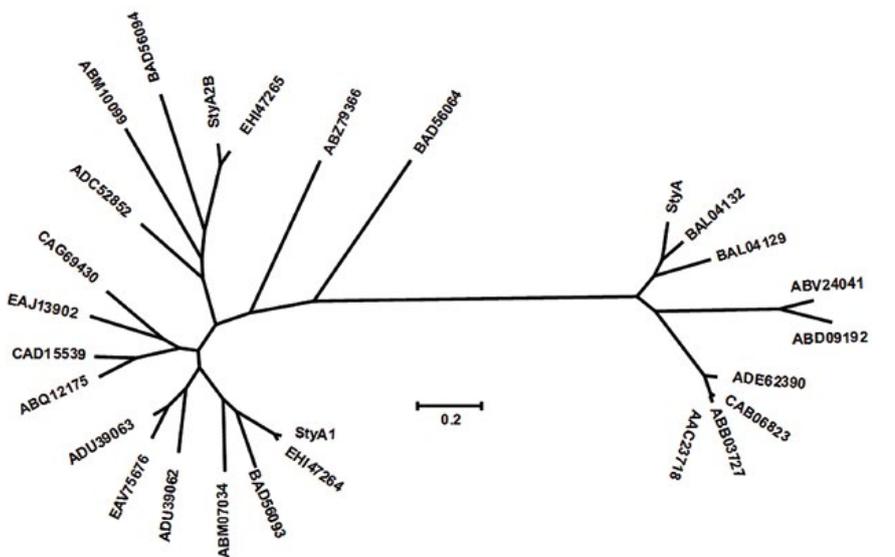


Abb. 3: Das Dendrogramm verschiedener SMO zeigt eine deutliche Clusterbildung von StyA1/StyA2B (links) und normalen SMOs (rechts). Zudem wird ersichtlich, dass StyA1 und StyA2B sich untereinander ähnlicher sind als jeweils zum StyA. Diese Unterschiede nach Maßgabe der Verwandtschaftsanalyse spiegeln auch die experimentell ermittelten Daten zur Biochemie wider. Ein detaillierter Stammbaum wurde bereits publiziert [Tischler et al. 2012].

StyA2B, zusammen im Molverhältnis 1 zu 1 die höchste katalytische Aktivität zu erbringen (Hinweise auf eine Protein-Protein-Wechselwirkung). Leider konnte dies durch weitere Versuche bisher nicht nachgewiesen werden.

Die neuartige SMO aus StyA1 und StyA2B unterscheidet sich nicht nur in ihrer Zusammensetzung, sondern auch in ihren Eigenschaften deutlich von den herkömmlichen Zweikomponenten-SMO. Diese Aussage wurde auch durch eine umfassende phylogenetische Untersuchung (Verwandtschaftsanalyse) bestätigt (Abb. 3) [Tischler et al. 2012]. So bilden die StyA1/StyA2B und ähnliche SMO einen eigenen Zweig im Dendrogramm. Dieser ist klar getrennt von dem Zweig der herkömmlichen SMO (StyA). Eine Datenbankanalyse ergab, dass es nur sehr wenige dieser fusionierten SMO vom StyA2B-Typ gibt. Die meisten davon wurden bisher in Rhodococci identifiziert. Dieses Ergebnis lässt die Schlussfolgerung zu, dass sich die Einkomponenten-SMO aus den Zweikomponenten-SMO entwickelt haben und im Laufe der Zeit verändert haben könnten.

Detaillierte Untersuchungen des Styrolabbaus durch *Rhodococcus opacus* 1CP zeigten, dass auch hier SMO den Schritt Umwandlung von Styrol zu Styroloxid, katalysieren (Abb. 2). Bisher wurde nicht nachgewiesen, ob sowohl StyA1 als auch StyA2B involviert sind. Dies herauszufinden, ist Teil eines aktuellen Projekts der AG Umweltmikrobiologie.

Ausblick

Die während der Promotion erzielten Ergebnisse führten zur erfolgreichen Einwerbung zweier Forschungsprojekte. Im Rahmen des transnationalen „GET-GEOWEB“-Projekts zur Genomik und Transkriptomik in der Biotechnologie suche ich als Leiter einer Nachwuchsforschergruppe nach neuen, interessanten Biokatalysatoren für die Weiße Biotechnologie. Der Abbau von Umweltschadstoffen (u. a. Styrol) wird in diesem Rahmen ebenfalls eingehend studiert, denn häufig findet man in von Bakterien stimulierten Abbauwegen hochselektive Biokatalysatoren. Zudem versuchen wir, mit Hilfe von molekulargenetischen Mitteln (z. B. dem DNA-Shuffling) das Design ausgewählter Styrol-Monooxygenasen dahingehend zu optimieren, dass diese sowohl eine höhere spezifische Aktivität aufweisen als auch auf ein breiteres Substratspektrum anwendbar sind.

Danksagung

Ich danke dem Verein Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg für die Auszeichnung meiner Dissertation mit dem Bernhard-von-Cotta-Preis 2012. Für eine umfassende Betreuung und Unterstützung bedanke ich mich bei Dr. Stefan Kaschabek und Prof. Dr. Michael Schlömann sowie bei den Geldgebern der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und dem Fulbright Komitee.

Literatur

- Tischler D, Eulberg D, Lakner S, Kaschabek SR, van Berkel WJH, Schlömann M (2009) Identification of a novel self-sufficient styrene monooxygenase from *Rhodococcus opacus* 1CP. J Bacteriol 191:4996–5009.
- Tischler D, Gröning JAD, Kaschabek SR, Schlömann M (2012) One-component styrene monooxygenases: an evolutionary view on a rare class of flavoproteins. Appl Biochem Biotechnol 167:931–944.
- Tischler D, Kermer R, Gröning JAD, Kaschabek SR, van Berkel WJH, Schlömann M (2010) StyA1 and StyA2B from *Rhodococcus opacus* 1CP: A multifunctional styrene monooxygenase system. J Bacteriol 192:5220–5227.



Mit einem DBU-Stipendium begann 2008 meine Promotion in Freiberg am Institut für Biowissenschaften bei Prof. Michael Schlömann. Die Unterstützung des Vereins Freunde und Förderer der Technischen Universität Bergakademie Freiberg e. V. in Form von Reise- und Tagungskostenbeihilfen trug auch zur Finanzierung meines dreimonatigen Forschungsaufenthalts (2010) in den Niederlanden an der Wageningen Universität sowie des Besuchs der internationalen Mikrobiologie-Tagung der American Society for Microbiology in New Orleans (USA) 2011 bei.

Bernhard-von-Cotta-Preis 2012:

Simulation des Verformungsverhaltens laserverfestigter Karosseriestrukturen Markus Wagner¹

Einleitung

Wachsende Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung hinsichtlich Sicherheit und Komfort stehen dem allgemeinen Ziel nach Gewichtsreduzierung zum Zwecke der Ressourcenschonung entgegen [1]. Mit etwa 20–30% Anteil am Fahrzeuggesamtgewicht verkörpert die Karosserie ein Schlüsselement im PKW-Leichtbau. Hier werden heute in der Regel homogene Blechkonstruktionen mit konstanter Wandstärke eingesetzt (Abb. 1, links). Besonders nur lokal beanspruchte Bauteile werden dabei häufig überdimensioniert, da die Wandstärke entsprechend der höchsten lokalen Belastung ausgelegt werden muss. Das heißt, in niedrig belasteten Bereichen ist die Blechdicke höher als erforderlich, was ein unnötig hohes Bauteilgewicht zur Folge hat. Zudem werden verbreitet preisintensive hochfeste Stahlbleche eingesetzt. Derzeit muss also stets ein Kompromiss zwischen Bauteilmasse, -kosten und Crashesicherheit eingegangen werden.

Lösungsansatz

„Lokale Laserverfestigung“

Um das Eigenschaftsprofil eines Bauteils deutlich präziser auf die wirkenden Belastungen abzustimmen, wurde am Fraunhofer IWS der innovative Ansatz der lokalen Laserverfestigung entwickelt. Grundsätzlich wird auf den Einsatz kostengünstiger, niedrigfester Stahlbleche mit homogener, minimierter Wanddicke abgezielt – in den stark beanspruchten Bereichen wird aber der Werkstoff lokal verfestigt (Abb. 1, rechts).

Bei den überwiegend im Fahrzeugbau eingesetzten härtbaren Stählen wird dazu

die vom Schweißen dieser Werkstoffe bekannte martensitische Aufhärtung im Nahtbereich gezielt als lokale Verfestigungsmethode genutzt: Ein fokussierter Laserstrahl wird mit definierter Geschwindigkeit über die Blechoberfläche geführt. Der konzentrierte Wärmeinput bewirkt eine spurförmige, starke Erwärmung (Härten) oder sogar die Aufschmelzung mit anschließender Erstarrung (Umschmelzhärten) (Abb. 2, links).

Die schnelle Wärmeableitung ins angrenzende kalte Material sorgt für die Bildung schmaler, spurförmiger Werkstoffzonen (z. B. Martensit) mit deutlich erhöhter Festigkeit [2].

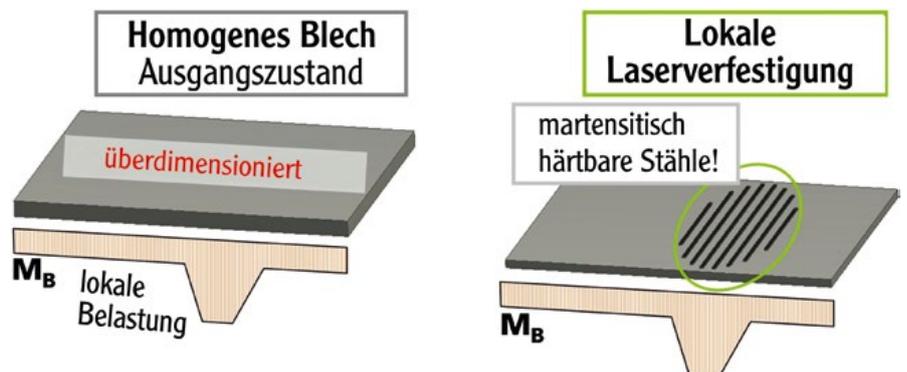


Abb. 1: Homogenes Blech (links), lokal laserverfestigtes Blech (rechts)

¹ Dipl.-Ing. Markus Wagner, Fraunhofer Institut Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, markus.wagner@iws.fraunhofer.de

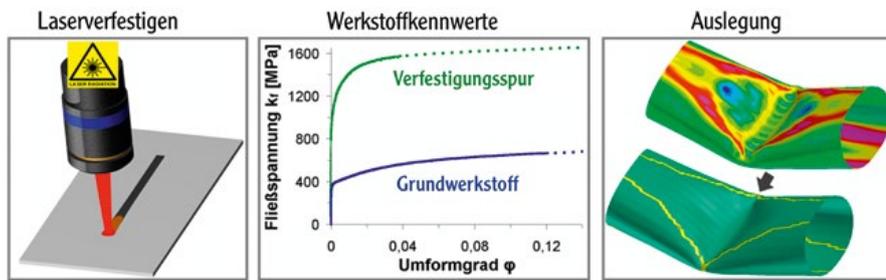


Abb. 2: Vorgehensweise zur Auslegung crashoptimierter Laserverfestigungsstrukturen

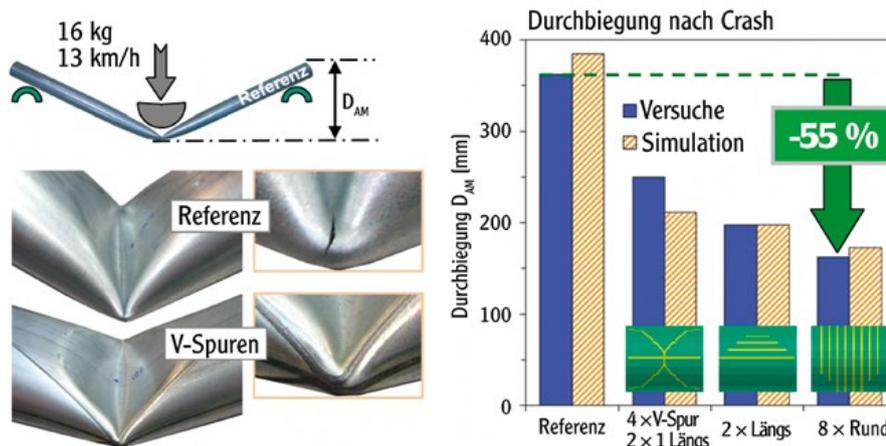


Abb. 3: Ergebnisse der Biegecrashversuche an laserverfestigten Rohrprofilen im Vergleich zur Simulation

Aufbereitung von Werkstoffdaten für die Simulation

Zur Abbildung des komplexen Festigkeitsprofils wurde am Fraunhofer IWS eine Vielzahl von Werkstoffdaten (Fließkurven) sowohl für die verfestigte Zone als auch für den unverfestigten Grundzustand für unterschiedliche Werkstoffe ermittelt. Mithilfe geeigneter mathematischer Ansätze wurden daraus Werkstoffmodelle für die Crashsimulation entwickelt (Abb. 2, Mitte).

Wegen der geringeren Dehnbarkeit der gehärteten Zonen ist es erforderlich, Werkstoffschädigungsvorgänge in der Simulation mit zu berücksichtigen. Über die numerische Nachrechnung der Ergebnisse aus den durchgeführten Zugversuchen wurden die Werkstoffmodelle im Anschluss validiert. Auf diesem Wege gelingt es, das Verhalten des Verbunds aus unbeeinflusstem Grundwerkstoff und verfestigtem Schmelzgut bis zu einem Umformgrad von etwa $\phi = 0,9$ realistisch abzubilden.

Die FE-Simulationen der Zugversuche sowie der Bauteile unter Crashbelastung wurden mit dem PAMCRASH-Solver unter Verwendung von Schalenmodellen ausgeführt.

Simulation und Crashtests an lokal laserverfestigten Blechprofilen

Crashbelastungen rufen in der Regel komplexe Hochgeschwindigkeitsdeformationsvorgänge im Bauteil hervor. Durch die Verwendung lokal laserverfestigter Strukturen wird in erster Linie eine Erhöhung des Deformationswiderstands des Bauteils angestrebt. Darüber hinaus kann auch das Versagensverhalten beeinflusst werden, indem beispielsweise der Ort der ersten plastischen Deformation vorgegeben wird.

Um die für die jeweils anliegende Belastung günstigste Lage, Gestalt und Orientierung der Verfestigungsspuren und den optimalen Volumenanteil dieser harten, schwer deformierbaren Verfestigungszonen zu ermitteln (Abb. 2, rechts) ist eine numerische Simulation des Bauteilverhaltens unter Crashbelastung unerlässlich [3].

Das FE-Modell dafür enthält sowohl Elemente mit Grundwerkstoffeigenschaften als auch Härtespurelemente, deren Festigkeit das Zwei- bis Dreifache derjenigen des Grundwerkstoffs erreichen kann. Das Simulationsmodell wurde anhand experimenteller Belastungsversuche an vereinfachten Crashbauteilen

überprüft und angepasst. Es gelang, das Crashverhalten lokal laserverfestigter Realbauteile in der Simulation präzise abzubilden.

U. a. wurden für eine Biegecrash-Belastung, wie sie beispielsweise bei einem Auffahrunfall (Bumper) oder beim Seitencrash (Schweller, B-Säule) auftritt, konkrete crashoptimierte Spurdesigns mit Hilfe der numerischen Simulation entwickelt und mittels Laser auf Realbauteile übertragen (Abb. 3). Die Ergebnisse der Crashtests zeigen, dass sich die Durchbiegung eines mit optimierter Verfestigungsstruktur (8 Rundspuren) ausgestatteten Rohrprofils im Vergleich zur konventionell gestalteten Referenz um mehr als die Hälfte reduzieren lässt, wobei lediglich 1% des Bauteilvolumens verfestigt wurde. Das Realverhalten des Bauteils konnte dabei gut mittels der FE-Simulation vorhergesagt werden.

Fazit

Durch die Einbringung lokaler Laserverfestigungsstrukturen kann demnach eine erhebliche Steigerung der Crashbelastbarkeit von Karosseriebauteilen erreicht werden. Mit Hilfe der Simulation können belastungsangepasste Verfestigungsstrukturen besonders kosten- und zeiteffizient entwickelt und optimiert werden. Die dafür notwendigen Werkstoffdaten sind aus Zugversuchen zugänglich. Somit lassen sich Bauteile mit hoher Belastbarkeit, geringem Gewicht und unter kostengünstigem Einsatz von Material und Fertigungsressourcen herstellen. Im nächsten Schritt soll diese Technologie durch ein automatisiertes Optimieren der Spurgeometrie perfektioniert werden.

Danksagung

Bei Dr. Axel Jahn bedanke ich mich herzlich für die gewährte Unterstützung.

Literatur

- 1 Sahr, Christian; Lesemann, Micha; Berger, Lutz; Butcher, Neil; Taylor, Richard; Hart, Simon: Concept tools and simulation for lightweight body design. Konferenzbeitrag, Innovative Developments for Lightweight Vehicle Structures, Wolfsburg, 26-27.05.2009
- 2 Kröger, Matthias; Jahn, Axel; Wagner, Markus: Laserverfestigung, belastungsangepasstes Bauteil- und Werkstoffdesign mithilfe lokaler Laserverfestigung. lightweightdesign, Prüfung und Charakterisierung von Leichtbausystemen, Ausgabe 3/2012
- 3 Wagner, Markus: Simulation des Verformungsverhaltens laserverfestigter Karosseriestrukturen. Diplomarbeit, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden, 2011

Bernhard-von-Cotta-Preis 2012:

Strukturbestimmung von ausgewählten Seltenerdmetall-Verbindungen unter Nutzung der DAFS-Methode Melanie Nentwich¹

Für die Metalle der Seltenen Erden und deren Verbindungen gibt es dank ihrer vielfältigen magnetischen und elektronischen Eigenschaften zahlreiche Anwendungsfelder, u. a. im Bereich der Elektronik. Um die Komplexität der Eigenschaften für das Design von Materialien gezielt zu nutzen, ist es wichtig, die Verbindungsstruktur auf atomarer Ebene zu verstehen. In meiner Diplomarbeit habe ich mich mit der Strukturanalyse der Holmium-Palladium-Silizium-Verbindung Ho_2PdSi_3 und des Yttrium-Mangan-Eisen-Oxids $\text{YMn}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_5$ beschäftigt.

Die Struktur von Ho_2PdSi_3 ist prinzipiell aus der hexagonalen Basisstruktur von HoSi_2 ableitbar, indem partiell Si- durch Pd-Atome substituiert werden. Die eingebrachten Palladiumatome ordnen sich aber nicht zufällig an, sondern bilden eine kommensurabel modulierte Überstruktur aus. Nach Literaturangaben sollte es dadurch zu einer Verdopplung der HoSi_2 -Elementarzelle in a - und b -Richtung kommen, die aber von einer zusätzlichen Verachtfachung in c -Richtung begleitet sein kann [1]. Deshalb wurden für die detaillierte Analyse der Ho_2PdSi_3 -Struktur sowohl ein Modell mit einfacher als auch eines mit achtfacher c -Ausdehnung der Elementarzelle herangezogen (vgl. Abb. 1 und 2).

Die eingesetzte Methode, *Diffraction Anomalous Fine Structure* (DAFS), verbindet die Vorteile von kristallographischer und spektroskopischer Sensitivität und somit von Strahlungsbeugung und -absorption [2]. Für eine diesbezügliche Messung müssen sowohl der Reflex, an dem gebeugt werden soll, als auch die Absorptionskante, die den Energiebereich vorgibt, festgelegt werden. Eine theoretische

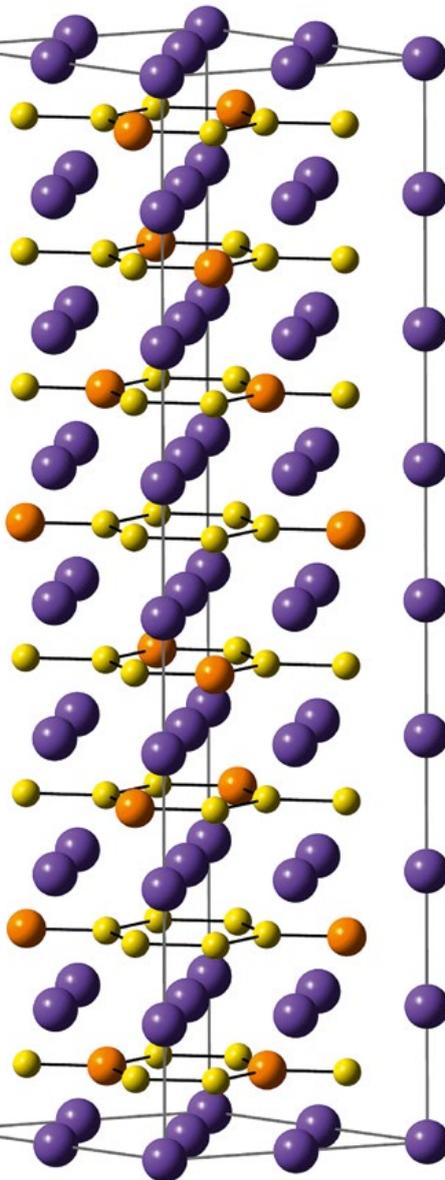


Abb. 1: Achtfache Ausdehnung in c -Richtung

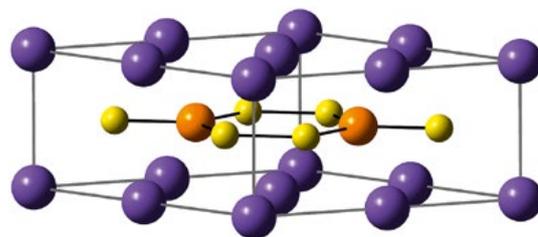


Abb. 2: Einfache Ausdehnung in c -Richtung

Strukturberechnung erfolgt über den kristallographischen Strukturfaktor $|F|^2$, der von der Energie und dem Reflex abhängt und proportional zur resultierenden Intensität ist. Ausgewählt wurden die Ho- L - und die Pd- K -Kante.

Angelehnt an die theoretische Beschreibung modulierter Strukturen im reziproken Raum [3], wurde die Herleitung des Strukturfaktors mit bis zu drei Modulationsvektoren vorgenommen und der jeweils resultierende Wert auf seine mathematische Übereinstimmung mit den experimentellen Daten geprüft. Auf Basis dieser Formeln wurden Python-Programme geschrieben, die bei der Auswahl von geeigneten Reflexen helfen sollten. Im Rahmen der vorteilhaften Kooperationsverträge der TU Bergakademie Freiberg mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) war es möglich, die Reflexe am Speicherring DORIS III zu vermessen. Außerdem wurde eine detaillierte Simulation der Kurven mit der Software *Finite Difference Method for Near Edge Spectroscopy* (FDMNES) [4] am hiesigen *High Performance Compute Cluster* (HPCC) durchgeführt.

Auf der Grundlage des Vergleichs der Ergebnisse der beiden Modelle mit denen des Experiments konnten bis zum Ende der Diplomarbeit erst vorläufige, noch nicht eindeutige Aussagen darüber getroffen werden, welcher Strukturvorschlag für Ho_2PdSi_3 besser passt. Je nach untersuchter Kante eignete sich das Stapelmodell stärker oder auch schwächer als das für die Monolage zur Interpretation der experimentellen Daten. Die Arbeiten zur Lösung der Strukturfragen werden fortgesetzt. Am DESY wurde dazu ein Überstrukturreflex mit DAFS vermessen, dessen Existenz stark für die achtfache Stapelung spricht. Zudem wurden die Parameter für die Simulationen verfeinert und auch der Überstrukturreflex modelliert. Insgesamt deuten die experimentellen und theoretischen Befunde auf ein partiell geordnetes Atomsystem hin, in dem sowohl die achtfache Überstruktur als auch die hochsymmetrische Stapelfolge ausgebildet sind.

Literatur

- F. Tang et al. (2011): Crystallographic superstructure in R_2PdSi_3 compounds (R = heavy rare earth), *Phys. Rev. B* 84, 104015, doi: 10.1103/PhysRevB.84.104105.
- L. B. Sorensen, J. O. Cross, M. Newville, B. Ravel (1994): Diffraction anomalous fine structure – Unifying x-ray diffraction and x-ray absorption with DAFS, In: *Materlik: Resonant anomalous x-ray scattering: theory and applications*, ISBN: 978-0444820259
- S. van Smaalen (2007): *Incommensurate Crystallography*, Oxford University Press, ISBN: 978-0-19-965923-4.
- O. Bunau, Y. Joly (2009): Self-consistent aspects of x-ray absorption calculations, *J. Phys.: Condens. Matter* 21, 345501, doi: 10.1088/0953-8984/21/34/345501.

¹ Melanie.Nentwich@physik.tu-freiberg.de

Der Verein unterstützt ... Die folgenden Beiträge demonstrieren anschaulich das Engagement unseres Vereins zur Unterstützung von Studium und Forschung durch finanzielle Förderhilfe für Studenten und Nachwuchswissenschaftler bei Auslandsaufenthalten im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten, Praktika, Exkursionen sowie bei Besuchen bzw. der Organisation von Workshops und Tagungen.

Auslandsgeländepraktikum Chile/Argentinien – Exkursion der Superlative



Exkursionsteilnehmer bei der Untersuchung von neoproterozoisch-kambrischen Turbiditen (Puncoviscana Fm.) in der argentinischen Puna

Geologie zum „Anfassen“! Das knapp einmonatige vulkanologisch-sedimentologische Geländepraktikum in Chile und Argentinien (19.02.–16.03.2013) – unter der Leitung von Prof. Christoph Breitkreuz bot 25 Geowissenschaftlern die Möglichkeit, ihr Theoriewissen in der Praxis zu erproben. Neben wissenschaftlich-geologischen standen auch sozialkulturelle Inhalte im Vordergrund. Ermöglicht wurde das Praktikum durch die großzügige Förderung seitens des Vereins Freunde und Förderer sowie dank weiterer Spenden aus der TU Bergakademie und von Geo-Firmen.

Viele spannende Ereignisse galt es gemäß gut gefülltem Terminplan abzuarbeiten. Ziel war es, die geologischen Hintergründe und Auswirkungen eines Jahrmillionen währenden Vulkanismus, der dem Land Chile seinen Erreichung bescherte, zu erforschen. Denn zur Erinnerung: Chile befindet sich an einem aktiven Kontinentalrand, bei dem die ozeanische Nazca-Platte unter die kontinentale Südamerikanische Platte „geschoben“ wird. Durch Aufschmelzprozesse in der abgetauchten Platte bildete sich ein noch heute aktiver, bis nach Argentinien hineinreichender vulkanischer Gürtel aus.

Bei dem Geländepraktikum bewegte sich die Gruppe – 22 Studenten, zwei Doktoranden und ein Professor der TU Bergakademie Freiberg – von der Küste

Chiles allmählich in das sonnenwarme Landesinnere hinein, dorthin, wo sich die aktiven Vulkane und großen Lagerstätten befinden. Der Weg führte am weltgrößten „Loch“ der Erde, der Kupfermine Chuquicamata, vorbei. Sie war nur eine der vielen spannenden Stationen, die mit fünf gemieteten Pickup-Trucks auf Asphalt-, Schotter- oder Salzstraßen angefahren wurden. Die besagte Mine, eigentlich ein Tagebau, ist bereits 5 km lang, 3 km breit und 1 km tief in den Erdboden „gegraben“ und beweist eindrucksvoll, wie wertvoll Geologie, Geotechnik und Rohstofferkundung gerade auch im Ausland sind. Mit Radladern von 400 t Kapazität werden pro Tag bis zu 500.000 t Gestein bewegt und daraus 1.500 t reinen Kupfers gewonnen.

Doch dies war noch längst nicht alles. Auf der Fahrt durch die Hochkordillere fuhr die Gruppe mit ihren kleinen Geländewagen bis auf knapp 5.000 Höhenmeter hinauf und somit ganz nah an schlafende, aber stetig qualmende Vulkane und Schlackenkegel heran. Die dünne Höhenluft machte nicht nur der Technik, sondern auch den Menschen zu schaffen. Beide keuchten bei jeglicher Art von Bewegung. Bei deutlich stärkerer Sonneneinstrahlung wehte aber ein frischer Wind, der stetig Sand und Staub in Form von Windhosen aufwirbelte und

uns entgegenblies. Die gefühlten Temperaturen waren auf jener Höhe sehr angenehm – deutlich angenehmer als 2000 Höhenmeter (Hm) tiefer in der trockensten Wüste der Welt, der Atacama.

Der Kampf gegen die UV-Strahlung wurde mit starker Sonnenmilch bestritten, aber leider nicht immer gewonnen. Dennoch wurden alle Mühen mit dem Erlebnis einer wunderschönen Landschaft und tollen geologischen Aufschlüssen (Gesteinen, die es zu untersuchen galt) belohnt. Riesige Salzebenen mit Lamas, Alpakas und Co. sowie Salare mit türkisfarbenem Wasser und wildlebenden Flamingos, umgeben von eindrucksvoller Vulkanlandschaft – oder aber der kristallklare Sternenhimmel – galten in jeder Hinsicht als ein respektabler Ausgleich für alle Beschwerlichkeiten. Auch ein Bad im heißen und höchstgelegenen Geysirwasser der Welt (4277 Hm) – im umfassenden Panorama des rauchenden Vulkans „El Tatio“ – war einer der Höhepunkte der Exkursion.

Als Unterkünfte für die Teilnehmer dienten übrigens einfache Hostels. Dazu hatten sowohl externe Förderer, aber in erster Linie die Teilnehmer selbst einen erheblichen Eigenanteil zu tragen, einen Beitrag, der sich lohnte, denn die Erkundungen sollten die junge Gruppe auch noch in den Nordwesten Argentiniens verschlagen, den letzten Abschnitt der Andenüberquerung. Dort traf sie auf die Kollegen der „Universidad Nacional de Salta“, die uns den komplexen Bau der Ostkordillere erklärten.

Ca. 200 km östlich jener Vulkankette vollzogen sich hier bis in die jüngste Zeit geologische Hebungen und Senkungen (sog. Aufschiebungen). Diese sind vor allem durch den ostwärts gerichteten Druck verursacht, den die ozeanische Nazca-Platte auf den Rand von Südamerika ausübte und auch immer noch ausübt. Der andine Kontinentalrand wird regelrecht auf den brasilianischen Schild aufgeschoben. Dabei entstehen nicht nur aus der Sicht der Geologen eindrucksvolle Gesteine, die so einiges zu erzählen haben. Die farbenreichen Facetten der Schichten des Humahuaca-Tals, keine 4 Millionen Jahre alt, sind durch Druck großflächig verstellt und gefaltet worden. Auch heute gibt es dort beim Aus-

gleich dieser Spannungen noch spürbare Erdbeben.

Die Anwesenheit der Freiburger Abenteurer blieb nicht unbeachtet. An einem Aussichtspunkt oberhalb des Ortes Tilcara stattete der lokale Bürgermeister zusammen mit dem lokalen Fernsehen der Truppe einen spontanen Besuch ab. Durch ein in Spanisch geführtes Interview mit Prof. Breitzkreuz ist unsere Universität seither zumindest in dieser argentinischen Andenregion in aller Munde: internationale Werbung auf andere Art und Weise.

Im Übrigen sind die steilen Hänge und tiefen Täler der Anden gefürchtet

wegen der häufigen Hangrutsche und der verheerenden Schuttströme, besonders bei starken Regenfällen (Januar und Februar). Kleine Bäche im Tal schwellen plötzlich an und entwickeln Flussbetten nach ihrem Belieben mit, wenn auch flachen, aber dennoch reißenden Strömungen. Das tägliche Brot der hiesigen Bauingenieure und Geotechniker ist die Instandsetzung zerstörter Straßen, Wasserleitungen sowie Strom- und Kommunikationssysteme.

Bemerkenswert ist auch der Floren- und Faunenwechsel, der sich ostwärts jenseits der Ostkordilleren bis in das argentinische Inland hinein vollzieht, von

der kargen Wüste mit mehr als mannshohen Kakteen und stacheligen Sukkulenten hin zum dicht wuchernden und dunkelgrün leuchtenden subandinen Urwald mit einer Geräuschkulisse, wie man sie sonst nur aus Filmen kennt. Eine enge Passstraße von Tilcara in Richtung Salta führte dort entlang und lud zum Staunen ein.

Doch auch die schönsten Momente gehen vorüber. Am 16. März 2013 trafen alle Teilnehmer wieder gesund im verschneiten Freiberg ein. Das gewonnene Wissen und die vielen Erinnerungen werden unvergessen bleiben.

■ Ludwig Luthardt & Daniel Falk



Diana Oettel und Micha Zauner auf einem Obsidianfeld an der Caldera Jarellón

Foto: SUSANNE STEGEL

Obsidian-Probenahme in Chile

Im Rahmen meiner Masterarbeit am Institut für Mineralogie unternahm ich im Oktober 2012 eine dreiwöchige Reise nach Chile. Ihr Zweck war die Probenahme von Obsidianen – vulkanischen Gesteinsgläsern, die für meine Qualifizierungsarbeit in Freiberg analysiert werden sollten. Dazu wurden zwei Obsidianvorkommen ausgewählt: eins davon in der Atacamawüste im Norden Chiles, das andere in der Region Maule in Mittelm Chile.

Begleitet wurde ich von Diana Oettel und im ersten Teil der Reise zusätzlich von Micha Zauner, ebenfalls zwei Frei-

berger Studenten der Geowissenschaften. Am 8. Oktober flogen wir von Dresden über Frankfurt und Madrid nach Santiago de Chile und dann weiter in die Hauptstadt der Region Antofagasta. Dort bestiegen wir den Überlandbus, der uns durch die trockenste Wüste der Welt zu dem kleinen Städtchen San Pedro de Atacama brachte. Diese Touristenhochburg liegt in einer Oase am Nordrand des Salar de Atacama mitten in der Wüste. Hier übernachteten wir die nächsten ein-einhalb Wochen in einem kleinen Hostel, um von dort aus zu dem ersten Obsidianvorkommen zu gelangen. Dafür mieteten wir einen Geländewagen. Das Vorkommen befindet sich an der Caldera Jarellón auf dem sog. Altiplano, einer Hochebene auf über 4.000 m. Um zur Caldera Jarellón

zu gelangen, mussten wir etwa 130 km bewältigen, die meisten davon bequem auf der Asphaltstraße, die nach Argentinien führt. Die letzten 30 km führten uns dann über eine holprige Wüstenpiste direkt bis zu den Obsidianfeldern am Fuße der Caldera, die teilweise bis nach Bolivien reicht, in einer Höhe von über 4.500 m über NN. Bei diesen Obsidianfeldern handelt es sich um die verwitterten Reste eines etwa 3,6 Millionen Jahre alten Obsidianlavastroms [Seelenfreund et al., 2010]. Die Erosion durch Wind und Wasser hat jedoch ganze Arbeit geleistet, sodass heute nichts mehr von einem Lavastrom zu erkennen ist. Der Obsidian liegt im unteren Bereich nur als Kies vor, etwas weiter oben hin zum Rand der Caldera findet man auch größere, weni-



Susanne Siegel am beprobten Lavastrom an der Laguna del Maule

ger gerundete Blöcke. Obwohl die Gläser eine äußerliche Verwitterungsschicht aufweisen, zeigen die Proben nach dem Aufschlagen mit dem Geologenhammer eine gute Substanzqualität. Im Inneren ist ihr Zustand noch sehr frisch, das Glas ist gut erhalten. Man kann zum Teil interessante Strukturen erkennen, die den schwarzen Obsidian durchziehen. So weisen einige Proben eine enorme Farbvielfalt auf – mit Bänderungen bzw. Schlieren in Rot, Braun und Grau. Außerdem enthalten einige der genommenen Proben Sphärolithe, radiale Kristallisationsdomänen.

Während der Probenahme hatten wir teilweise mit den für diese Region typischen Stürmen zu kämpfen. Aber die beeindruckende Landschaft der Atacamawüste entschädigte uns für alle Mühen.

Danach fuhren wir von Santiago aus mit dem Überlandbus ca. 250 km gen Süden in die Hauptstadt der Region Maule, nach Talca. Die klimatische Umstellung war enorm. Von der Hitze, Trockenheit und den heftigen Winden der Wüste kamen wir nun in ein regenreiches Gebiet mit mildereren Temperaturen. Die Landschaft der Region Maule ist voller Wälder mit zahlreichen in Chile endemischen Bäumen.

Mit einem Mietwagen erreichten wir ein kleines Refugio im Dörfchen Armerillo am Oberlauf des Río Maule, in dem wir die nächsten Tage übernachteten. Die Probenahme an einem Obsidianlavastrom an der Laguna del Maule, einem See nahe der argentinischen Grenze, war durch die Wetterbedingungen erschwert. Da der Winter in Chile kaum erst vorüber war, gab es zum Teil noch stärkere Schneefälle, aber auch Geröllstürze in den Anden. Daher durften wir die etwa 80 km lange Fahrt zur Laguna del Maule nach den Vorgaben der Cara-

bineros nur mit einem ortsansässigen Führer antreten. Und tatsächlich lag an der Laguna oberhalb 2.200 m teilweise noch recht viel Schnee. Rund um diesen See gibt es mehrere Vulkankegel und Lavaströme, die während der letzten 1,5 Millionen Jahre entstanden sind [Hildreth et al. 2010]. Der beprobte Obsidianlavastrom am Nordrand der Laguna hat ein Alter von rund 23.300 Jahren. Die hier genommenen Proben unterscheiden sich stark von denen, die an der Caldera Jarellón genommen wurden. Sie weisen keine Bänderung auf, sind jedoch zum Großteil von Kristallisationsdomänen durchzogen – oft in Form von Sphärolithen bis zu einer Größe von ca. 1 cm. Außerdem sind die Obsidiane an zahlreichen Stellen partiell aufgeschäumt, wobei sich oftmals dichte Lagen schwarzen Obsidians mit blasigen, helleren Schichten abwechseln.

Nach Abschluss der Probenahme traten wir – schwer bepackt mit Obsidianproben – unsere Heimreise an. Mit dem Bus fuhren wir zurück nach Santiago, von wo aus wir nach Deutschland flogen. Insgesamt hatten wir ca. 30 kg Gestein im Gepäck, die wir problemlos ausführen konnten.

Die Reise nach Chile brachte mir neben den Proben für meine Masterarbeit viele großartige Erfahrungen und einen Gewinn an interessanten Eindrücken. Ich hatte die wundervolle Gelegenheit, „das Land mit der verrückten Geografie“ mit seinen freundlichen Menschen kennen zu lernen.

Besonderer Dank gilt Prof. Gerhard Heide für die Vergabe dieses Themas und die Ermöglichung der Reise nach Chile. Des Weiteren möchte ich dem VFF für die finanzielle Unterstützung danken. Mein Dank gilt außerdem Prof. Hans Wilke und Benigno Godoy Neira, die bei der Reiseplanung behilflich waren. Diana Oettel und Micha Zauner danke ich für ihre Unterstützung während der Reise.

Quellen:

- Hildreth, W.; Godoy, E.; Fierstein, J.; Singer, B. 2010. Laguna del Maule Volcanic Field; Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean range crest in central Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 63. 145 p.
- Seelenfreund, A.; Pino, M.; Glascock, M.D.; Sinclair, C.; Miranda, P.; Pasten, D.; Cancin, S.; Dinator, M.I.; Morales J.R. 2010. Morphological and Geochemical Analysis of the Laguna Blanca/Zapaleri Obsidian Source in the Atacama Puna. Ge archaeology: An International Journal. Vol. 25. No. 2. 245-263.

■ Susanne Siegel

Fachexkursion 2013 nach Österreich



Bericht zur Fachexkursion des Studiengangs Markscheidewesen und angewandte Geodäsie vom 29. Mai bis 2. Juni 2013

An einem verregneten Mittwochmorgen begaben sich 13 Freiburger Studenten des 4. bis 10. Semesters mit drei Institutsmitarbeitern auf eine fünftägige Fachexkursion nach Österreich. Vom 29. Mai 2013 bis zum 2. Juni 2013 besichtigten wir die Südwestdeutsche Salzwerke AG, den Scheibengipfeltunnel bei Eningen, das Pumpspeicherkraftwerk Burgschrofen in Österreich und den Brenner-Basistunnel.

Unser erster Exkursionstag führte uns zur Südwestdeutschen Salzwerke AG nach Heilbronn. Ende des 19. Jahrhunderts begann man mit dem Abbau der Steinsalzlagerstätte, einer der mächtigsten im süddeutschen Raum. Das gewonnene Stein- und Siedesalz wird für Industrie, Gewerbe, Haushalte und für den Winterdienst aufbereitet. Sophie Peysa, die junge leitende Markscheiderin des Unternehmens, begrüßte uns herzlich und erklärte uns bei einer untertägigen Rundfahrt durch die Lagerstätte deren Aufbau, das Abbauverfahren sowie die Durchführung von Konvergenzmessungen im Salz und brachte uns so ihre markscheiderische Tätigkeit im Unternehmen nahe. Gemeinsam ließen wir den gelungenen Tag in einer für die Region typischen Besenstube bei einem Glas Wein ausklingen. Am Folgetag besichtigten wir die Baustelle zum Scheibengipfeltunnel. Er ist Bestandteil einer Ortsumgehung zur Entlastung der Reutlinger Innenstadt. Herr Jäckel, leitender Geologe des Projekts, gab uns zunächst einen Überblick über das Bauvorhaben. Anschließend fuhren wir in die Tunnelröhre ein, wo der leitende Vermessungsingenieur auf uns wartete. Er diskutierte mit uns die unterschiedlichen vermessungstechnischen Aufgaben im Tunnelbau, und gemeinsam führten

wir anschließend eine Einmessung der Bögen an den Baugrubenwänden durch. Sie ist Grundlage für eine nahtlose Verschalung des Tunnels. Von Innsbruck aus führen wir am nächsten Morgen nach Italien zur Besichtigung des Brenner-Basistunnels, einer Alpenunterquerung entlang der Achse München-Verona zwischen Innsbruck und Franzensfeste. Im Jahr 2011 begann der Bau der zweiröhrigen Tunnelhauptachse. Dieser erfolgt zu 30 % im konventionellen Sprengvortrieb und zu 70 % maschinell mit Tunnelbohrmaschinen. Mit einer Länge von insgesamt 63 km wird der Brenner-Basistunnel die längste unterirdische Eisenbahnverbindung der Welt sein. Da der Tunnel ein grenzüberschreitendes Gemeinschaftsprojekt Österreichs und Italiens ist, gibt es aus vermessungstechnischer Sicht einige Besonderheiten, die uns zunächst theoretisch und anschließend bei einer Befahrung vor Augen geführt wurden.

Das Pumpspeicherkraftwerk Kautenthal der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) ist eine der größten Anlagen für die Stromerzeugung in Österreich und war die letzte Station unserer Exkursion. Herr Payr, Geodät der TIWAG, zeigte uns zunächst die Maschinenhallen im Krafthaus Prutz. Anschließend unternahmen wir bei Sonnenschein einen kurzen Gipfelaufstieg zu einer tachymetergestützten Monitoringstation und fuhren dann miteinander zum Wasserspeicher Gepatsch (6 km Länge und 730 m Breite) in die Berge. Der Schüttdamm des Sees ist der höchste Österreichs und bedarf ständiger Überwachungsmessungen. Neben den Staudammeobachtungen werden auch Hangüberwachungen wegen der Rutschungsgefahr vorgenommen. Zu diesem Zweck besichtigten wir einen Stollen, in dem Inklinometer-, Extensiometer- und Schlauchwagenmessungen ausgeführt werden.

Wir bedanken uns herzlich bei allen Vortragenden für ihre sehr interessanten Ausführungen. Unser Dank gilt auch Herrn Martienßen, Herrn Floth und Frau Hößelbarth vom Institut Markscheidewerden und Geodäsie, für die Organisation dieser spannenden und abwechslungsreichen Exkursion. Wir bedanken uns außerdem recht herzlich beim Verein Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V. und beim Deutschen Markscheiderverein für die Teilfinanzierung des umfangreichen Exkursionsprogramms, ohne die seine Durchführung in diesem Umfang nicht möglich gewesen wäre.

■ Die Studierenden des 4. bis 10. Semesters



FOTOS ©: NICO SCHULTZE

Nandus in der brasilianischen Steppe

Beregnungsexperimente in Brasilien

Es kam sehr überraschend, als ich während der Mittagspause in der Freiburger Mensa gefragt wurde, ob ich denn Lust hätte, mit Herrn Dr. Schindewolf vom Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau in Brasilien für meine Masterarbeit Beregnungsexperimente durchzuführen. Natürlich war ich erstmal sehr geschockt, hatte ich doch noch nicht einmal meine Bachelorarbeit abgeschlossen, aber die Begeisterung ließ nicht lang auf sich warten. Und so geschah es, dass ich Mitte Februar 2013 mit gebrochenem Portugiesisch, Stipendium und jeder Menge Probenütten im Flugzeug auf dem Weg von Dresden nach Cuiabá saß. 37 Stunden sollte die Hinreise – eines gecancelten Flugs und eines unwissenden Taxifahrers wegen – dauern, bis ich mich schlussendlich im Apartment erschöpft ins Bett legen konnte. Das Zimmer teilte ich mir die ersten drei Wochen mit einem brasilianischen Doktoranden, der ebenfalls Forschungen in Cuiabá betrieb.

Unser Projekt nennt sich CarBioCial (*Carbon sequestration, biodiversity and social structures in Southern Amazonia*). Es handelt sich um eine Kooperation zwischen brasilianischen und deutschen Universitäten und Behörden, finanziert durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung. Ziel des Projekts ist die Implementierung von Modellen zur Ermittlung eines optimalen Kohlenstoff-Land-Managements in einem Online-Portal, sodass brasilianische Inte-

ressenten nützliche Informationen gewinnen können. Gerade in Hinblick auf die steigenden globalen Temperaturen sowie die intensivere Landwirtschaft und den damit verbundenen Schwund in natürlichen Ökosystemen und Lebensräumen ist es wichtig, den Kohlenstoffkreislauf besser zu verstehen, um ihn in der Landwirtschaft zu optimieren. Für die Feld-Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Regionen ausgewählt: 1. Süd-Pará, wo derzeit eine starke Entwaldung stattfindet, 2. Nord-Mato-Grosso, wo erst vor wenigen Jahren mit der Soja-Produktion begonnen wurde, und 3. Zentral-Mato-Grosso, wo seit über 20 Jahren intensive Landwirtschaft betrieben wird.

Das Projekt ist in 14 Subprojekte unterteilt, in deren Rahmen weitestgehend unabhängig voneinander Feld- und Laboruntersuchungen und Fernerkundungen in Brasilien durchgeführt werden. Das Subprojekt SP03, das von Dr. Schindewolf und Prof. Dr. Schmidt von der TU Bergakademie Freiberg geleitet wird, umfasst die Modellierung von Bodenerosionen einschließlich des damit verbundenen Kohlenstofftransports. Um ausreichend Daten für die Modellierung zu erhalten, müssen vor Ort Bodenparameter mittels Beregnungsversuchen gewonnen werden. Die dafür notwendige Beregnungsanlage sowie mehrere Laborräume stellt die Universität in Cuiabá zur Verfügung.

Landwirtschaftlich intensiv genutzte Böden zeichnen sich durch eine periodisch fehlende oder nur geringfügige Oberflächenbedeckung aus. Gerade im Saatbettzustand sind Böden sehr anfällig für Erosion, da die Regentropfen direkt auf den Boden fallen und sog. Splash-Erosion verursachen. Im Zusammenhang mit der Tatsache, dass brasilianische Steppen-Böden oft sehr tonreich sind, wird angenommen, dass auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen sehr starke Bodenerosion stattfindet.

Wir machten uns gleich am nächsten Tag an die Arbeit. Im Gewächshaus des Instituts für Agronomie musste die Beregnungsanlage abgebaut und zusammen mit vier 200-Liter-Fässern und einigen weiteren Ausrüstungsgegenständen ins Auto gepackt werden. Am darauffolgenden Tag fuhren wir 120 km westlich durch die brasilianische Steppe, genannt „Cerrado“, in Richtung der Kleinstadt Campo Verde (Zentral-Mato-Grosso). Die einst reichste Stadt Brasiliens hat sich vollständig auf die Agrarindustrie spezialisiert, was man ihr sofort ansieht. Die Region um Campo Verde besteht überwiegend aus Soja- Mais- und Baumwollfeldern sowie einigen wenigen Weiden.

Die Arbeit auf dem Feld gestaltete sich schwierig. Heiße Temperaturen um die 30 °C, hohe Luftfeuchtigkeit und regelmäßige Gewitter zur Mittagszeit zerrten an der Substanz. Dazu kamen einige unerwartete Probleme mit der Ausrüstung, wie beispielsweise ein überhitzter Motor an der Beregnungsanlage, verunreinigtes Benzin für den Generator oder eine gebrochene Querstrebe der

Beregnungsablage, die notdürftig geschweißt werden musste. Dennoch schafften wir es, an zwei verschiedenen Standorten insgesamt sechs Beregnungsversuche auf Flächen – einmal in trockener und einmal im bereits angefeuchteten Ausgangszustand – durchzuführen.

Bei jedem Beregnungsversuch werden gestörte und ungestörte Proben genommen, um bestimmte Bodenparameter im Labor ermitteln zu können. Ein Teil der Proben konnte vor Ort an der Universidade Federal de Mato Grosso in Cuiabá analysiert werden, ein anderer muss nach Deutschland gebracht werden, da nicht alle nötigen Analysengeräte vor Ort zur Verfügung stehen. Die anschließende Datenauswertung sowie die Modellierung nach dem Bodenabtragsmodell Erosion 3D wird in Deutschland vorgenommen, sobald alle notwendigen Daten erhoben sind.

Bei der Durchführung der ersten Beregnungsversuche auf einem Maisfeld mussten wir feststellen, dass die Hypothese vom Auftreten einer starken Bodenerosion nicht oder kaum zutrifft. Die Böden sind zwar sehr tonreich, bilden



Beregnungsanlage

aber trotzdem sandkorngroße Aggregate. Sie sind bezüglich ihrer Korngrößenverteilung zwar Tone, verhalten sich aber bezüglich der Infiltration von Regenwasser wie ein Sand mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit. Grund dafür ist die konservierende Bodenbearbeitung durch die brasilianischen Landwirte. Deshalb sind die Abflussrate und damit auch die vermutete Erosionsrate geringer als zunächst angenommen. Detaillierte Aussagen sollten jedoch die Modellierungen erst noch ermöglichen.

Ich kann auf sechs anstrengende aber auch schöne Wochen zurückblicken. Der Aufenthalt in Brasilien war eine sehr interessante und aufregende Erfahrung, die mich in vielerlei Hinsicht vorangebracht hat. Ich habe nun genug Daten für die Modellierung parat, um anschließend meine Masterarbeit schreiben zu können. Neben der vielen Arbeit fand ich auch Zeit, das Leben und die Menschen in Brasilien mit ihren Eigenheiten kennenzulernen. An die Hitze, den katastrophalen Straßenverkehr und die tropische Gelassenheit der Brasilianer denke ich noch heute manchmal mit einem Lächeln zurück.

Ich bedanke mich recht herzlich bei meinen Unterstützern, die mir diese Erfahrung ermöglicht haben!

■ Nico Schultze



Der Projektbus

Rasterelektronenmikroskopie: Experten diskutieren in Freiberg den Stand der Technik

In der modernen Geo-/Materialforschung ist der Zusammenhang zwischen den makroskopischen Kenngrößen und der mikroskopischen Struktur der Schlüssel zum Verständnis der Materialeigenschaften. Mit diesem Wissen lassen sich Herstellungs- oder Bearbeitungstechnologien optimieren bzw. neu entwickeln. Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) ist eine essenzielle Charakterisierungsmethode, die Zugang zur mikroskopischen Materialstruktur ermöglicht. Im Vergleich zur konventionellen Lichtmikroskopie bietet die Elektronenmikroskopie bei einer viel besseren Auflösung (~50 nm) wesentlich mehr Informationen, die aus der Wechselwirkung der Elektronen mit der Materialoberfläche resultieren. Dabei entsteht die elementspezifische, sogenannte charakteristische Röntgenstrahlung, durch deren Analyse auf die lokale chemische Zusammensetzung geschlossen werden kann.

Die räumliche Orientierung der Atomanordnung ist beispielsweise in

Gesteinen oder metallischen Werkstoffen nicht gleich und kann lokal variieren. Die ortsaufgelöste Bestimmung dieser Kristallorientierung durch die Beugung der Elektronen am Atomgitter gelingt häufig mit Hilfe eines REM. Die Untersuchungsmethode, genannt Elektronenrückstreuung (EBSD – *Electron BackScattered Diffraction*), war Schwerpunktthema des Arbeitskreistreffens „Mikrostrukturcharakterisierung im Rasterelektronenmikroskop“ der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM) vom 17. bis 19. Juni 2013. Ausgerichtet wurde das Treffen im Festsaal der „Alten Mensa“ durch das Institut für Werkstoffwissenschaft.

Heute stehen an der TU Bergakademie Freiberg zwölf Geräte an acht Instituten in drei Fakultäten zur Verfügung. Mit einer Rekordbeteiligung von ca. 120 Personen aus dem gesamten Bundesgebiet und dem benachbarten Ausland kamen so viele Teilnehmer wie noch nie zu diesem Arbeitskreistreffen. In 22

Fachvorträgen wurden methodische und materialspezifische Aspekte vorgestellt und diskutiert.

Am ersten Tag hatten die Vortragenden die Möglichkeit, ihre Auswertungsprogramme vorzustellen. Am zweiten Tag standen methodische Neuentwicklungen auf dem Programm. Am dritten Tag traf sich ein Teil der Gruppe zu einem Weiterbildungskurs, den Prof. H. Schaeben vom Institut für Geophysik und Geoinformatik leitete. Hier wurde die in Freiberg entwickelte MTEX vorgestellt und die Interessenten im Umgang mit dem Programm geschult.

Durch Firmenspenden und nicht zuletzt dank der Hilfe der Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e.V. konnte eine Pausenversorgung organisiert werden, die sehr zur konstruktiven und diskussionsfreudigen Atmosphäre des Treffens beigetragen hat. Die Teilnehmer hatten auch die Möglichkeit, die Geschichte Freibergs bei einem Rundgang durch die Innenstadt mit kompetenten Stadtführern kennenzulernen. Ein Gemeinschaftsabend in einer Freiburger Gastwirtschaft rundete die Tagung ab. ■ **Stefan Martin**



Die Conference on Fog, Fog Collection and Dew ist weltweit die bisher einzige Konferenz zum Thema „Nebel und Tau“. Alle drei Jahre bietet sie Spitzenforschern aus der ganzen Welt die Möglichkeit, Ergebnisse auszutauschen, Problemkreise zu analysieren und gemeinsam neue Projekte zu entwickeln. Mit einer weltweiten Community von ca. 250 „Nebelforschern“ ist diese Gemeinschaft recht klein.

Dank der Unterstützung durch den Verein der Freunde und Förderer der Technischen Universität Bergakademie Freiberg e.V. bot sich mir die Möglichkeit, an dieser Konferenz teilzunehmen. Ich bin Doktorandin an der TU Bergakademie Freiberg, Fakultät 3, und beschäftige mich in meiner Dissertation mit dem Phänomen Nebel und dessen chemischer Zusammensetzung. Der Fokus meiner Arbeit liegt auf den organischen Bestandteilen der Atmosphäre (kleine,

in Luft suspendierte Partikel, sog. Aerosole). Diese können aufgrund ihrer Größenverteilung tief in den menschlichen Atemtrakt eindringen und respiratorische sowie neurodegenerative Krankheiten hervorrufen. Inwieweit die toxischen Eigenschaften der Aerosole dabei zum Tragen kommen, hängt von deren Zusammensetzung ab. Sie wird u. a. durch den Nebel und dessen spezielle Mikrostruktur beeinflusst.

Bisher konnte ich drei organische Substanzklassen im Nebel des Erzgebirges nachweisen. Dazu zählen substituierte Dicarbonsäuren, kurzkettige Carbonsäuren bzw. deren Salze sowie Zucker. Nur wenige dieser substituierten Carbonsäuren sind bisher identifiziert. Im Rahmen meiner Arbeit gelang es mir erstmals, Verbindungen (sog. Hydroxybenzoesäuren) in Nebel- und Wolkenwässern nachzuweisen.

Aus den bisherigen Ergebnissen er-

gab sich ein hoher Bedarf an Fachkommunikation. Ein Forum dafür war die „6th Conference on Fog, Fog Collection and Dew“ dieses Jahr in Yokohama, Japan. Insgesamt waren 120 Teilnehmer mit 130 Beiträgen vor Ort. Schwerpunkte der Konferenz waren die atmosphärischen Erscheinungen von Nebel und Tau, deren chemische Zusammensetzung, ihre Mikrophysik, ihr Einfluss auf Ökosysteme und diverse Transportvorgänge sowie ihre Beprobung. Innerhalb von fünf Tagen wurden die neuesten Erkenntnisse zu diesen Themenbereichen diskutiert. Umrahmt wurde die Konferenz von vielfältigen sozialen und kulturellen Unternehmungen, die den Teilnehmern Land und Leute näherbrachten und eine angenehme, beinahe familiäre Atmosphäre schufen.

Mein Beitrag „*Fog as a transformer for organic aerosols – phase partitioning of carboxylic acids at a mountainous site in Germany*“ stieß auf breites Interesse und ich hatte zahlreiche Diskussionen und erhielt wertvolle Hinweise, die mir für die Schlussphase meiner Promotion von großem Nutzen sein werden. Land und Leute haben einen tiefen Eindruck bei mir hinterlassen.

■ **Stephanie Schüttauf**



Entscheidungen, Initiativen, Projekte

Auszug aus dem Rektoratsbericht der TU Bergakademie Freiberg 2012

Auch im Jahr 2012 hat die TU Bergakademie Freiberg ihr montanistisches Gründungsprofil den Anforderungen einer modernen Ressourcenwirtschaft entsprechend weiter geschärft und sich unter den deutschen Hochschulen als „Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.“ etabliert. Ihr modernes Ressourcenprofil ist dem Leitgedanken der nachhaltigen Entwicklung verpflichtet – mit den gleichrangigen Säulen Ökonomie, Ökologie und Soziales.

Dieser Leitgedanke bestimmt die Generalrichtung der Universität in Forschung und Lehre für den gesamten Bereich der konsequent auf den Kurs der nachhaltigen Entwicklung zu führenden Stoff- und Energiewirtschaft – entlang der Wertschöpfungsketten, die bei den primären, sekundären und/oder erneuerbaren Energie- und Rohstoffquellen ansetzen (siehe auch Grafik in der Abbildung oben). Die Wertschöpfungsketten entsprechen den oftmals komplexen Prozessabfolgen, beginnend bei der Erschließung der Rohstoffpotenziale über Problemlösungen zum verantwortungsvollen Umgang mit den aus ihnen extrahierten Nutzkomponenten – auf allen Stufen ihrer (nicht selten noch verlust-

reichen) Karriere durch alle stoffwirtschaftlichen Verflechtungen hindurch – bis hin zu den Endprodukten. Dabei gilt es möglichst schon vom Konzept her auf eine spätere, sichere Wiedergewinnung und -verwendung der Komponenten hinzulenken. Die Herausforderung besteht darin, diese Prozessabfolgen so zu optimieren, dass sie in ihrer Gesamtheit eine in absehbarer Zeit nicht unwiderruflich erschöpfbare, auch längerfristig tragfähige Energie- und Materialbasis für die Wirtschaft gewährleisten: von der Erkundung möglicher Aufkommensquellen über die Gewinnung, Aufbereitung und Veredelung bzw. Verarbeitung bis hin zur sicheren Handhabung der technischen und organisatorischen Probleme des Recyclings.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Bergakademie widmen sich im Rahmen der vier freibergspezifischen Profillinien Geo, Material, Energie und Umwelt den Schlüsselgliedern dieser technologischen Ketten, die für volks- und letztlich weltwirtschaftlich grundlegende Wertschöpfungen stehen.

Der Wert – oder genauer vielleicht:

die Maxime – Innovation verbindet sich mit der Verpflichtung zum ständigen Ringen um Erneuerung von der theoretischen Grundlagenarbeit an bis hin zur technischen Erprobung („Theoria cum Praxi“) und dem damit verbundenen Ziel der auf den Forschungsergebnissen basierenden Wertschöpfung. Die prominent vertretenen Grundlagendisziplinen Mathematik und Informatik, der Naturwissenschaften, des einschlägigen Ingenieurwesens sowie der wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät sind eng mit den Aktivitäten rund um die Wertschöpfungsketten und Profillinien und natürlich auch untereinander arbeitsteilig vernetzt.

Die solide finanzielle Basis unserer Forschungskraft – gemessen an den Drittmitteleinnahmen im Jahr 2012 – zeugt davon, dass in Freiberg offenbar Quellen der Wertschöpfung erschlossen werden, die ihrem Gewicht nach der Bergakademie im deutschlandweiten Vergleich eine Spitzenposition sichern.

Im Jahr 2012 konnten das Profil und das personelle Potenzial der Universität durch Berufungen auf Gastprofessuren

(5), Honorarprofessuren (1) und außerplanmäßige Professuren (2) gestärkt werden, insbesondere die Fakultät für Geowissenschaften und Geotechnik/Bergbau (Fak. 3) auf den Gebieten Sanierungsbergbau, Braunkohlenbergbausanierung, Angewandter Grundbau und Technologie des Abbaus von Erz- und Spatlagerstätten sowie die Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie (Fak. 5) auf den Gebieten Elektromagnetische Funktionswerkstoffe bzw. hochlegierte austenitische, nichtrostende Stähle. Weitere Berufungen gab es an der Fakultät für Chemie und Physik (Fak. 2) für das Gebiet Solarmodul技术 und Materialentwicklung sowie an der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik (Fak. 4) für das Gebiet Modellierung von Phasenwechselprozessen und Wärmeübertragern.

ERGEBNISSE DER FORSCHUNG Großprojekte

Besonders erfolgreich war das Jahr 2012 für die Arbeiten in den Sonderforschungsbereichen und Schwerpunktprogrammen der DFG auf dem Gebiet der Materialforschung.

Der Sonderforschungsbereich 799 „TRIP-Matrix-Composite“ erhielt die Bewilligung von Mitteln für die 2. Förderphase in den Jahren 2013 bis 2016 im Umfang von 10 Mio. Euro. Außerdem wurden zwei Wissenschaftler des SFB mit Auszeichnungen der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM) geehrt. Im SFB kooperieren Wissenschaftler aus vier Fakultäten, darunter Doktoranden, Nachwuchswissenschaftler und erfahrene Experten in insgesamt 18 Teilprojekten unter Leitung des Instituts für Werkstofftechnik (Sprecher: Prof. Horst Biermann). Ziel ist die Entwicklung einer neuen Klasse von Hochleistungsverbundwerkstoffen auf der Basis von TRIP-Stählen und Zirkoniumdioxid-Keramiken (TRIP: *transformation-induced plasticity*). Entstehen sollen extrem beanspruchbare und dennoch gut verformbare Werkstoffe, die z. B. als Crash-Absorber in der Automobilbranche eingesetzt werden können. Im zweiten Förderzeitraum bis 2016 steht das gezielte Design dieser Verbundwerkstoffe im Mittelpunkt. Außerdem sollen anwendungsrelevante Eigenschaften näher bestimmt und durch neue Herstellungsverfahren weitere Potenziale, zum Beispiel für den Leichtbau, erschlossen werden.

In die 2. Förderphase ging im Oktober 2012 auch das **Schwerpunktprogramm SPP 1418: „Feuerfest-Initiative zur Reduzierung von Emissionen – FIRE“**. Für die Jahre 2012 bis 2015 wurden weitere Fördermittel in Höhe von 1,8 Mio. Euro jährlich bewilligt. Im SPP „FIRE“ (Kordinator: Prof. Christos Aneziris, Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik) wird in sieben Teilprojekten mit dem Ziel geforscht, den Kohlenstoffanteil in Feuerfestmaterialien zu reduzieren und damit den Ausstoß klimaschädlichen Kohlendioxids zu verringern. In der zweiten Phase bis 2015 ist vorgesehen, die innovativen Werkstoffe in real verwendbare Bauteile für Ofenauskleidungen oder formgebende Werkzeuge zu überführen.

Im Dezember 2012 wurde das 3. Freiburger Feuerfestforum ausgerichtet. Dabei standen in einer gemeinsamen Postersession des SPP 1418 „FIRE“ und des **Sonderforschungsbereichs 920 „Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration — ein Beitrag zu Zero Defect Materials“** (Sprecher: Prof. Christos Aneziris, Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik) Ergebnisse und Vorhaben in den Teilprojekten dieser beiden DFG-Großprojekte der TU Bergakademie Freiberg zur Diskussion.

Im SFB 920 arbeiten 17 Wissenschaftler aus vier Fakultäten der Hochschule in 21 Teilprojekten zusammen. Ziel ist es, bei Werkstoffen durch die Einstellung exzellenter, an die Bauteilbeanspruchung angepasster funktionaler und adaptiver mechanischer Eigenschaften einen Innovationsschub bei Sicherheits- und Leichtbaukonstruktionen zu ermöglichen.

Bisher wurden Versuche insbesondere zur Erforschung neuer aktiver und reaktiver keramischer Filterwerkstoffe auf der Basis von kohlenstoffgebundenem Aluminiumoxid (Al_2O_3-C) und Magnesiumoxid ($MgO-C$) für die Stahlfiltration durchgeführt. Die dabei gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse waren u. a. Grundlage für die ersten drei Patentmeldungen des SFB 920.

Des Weiteren fanden auch die Arbeiten im **Projekt „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch Atomares Design und Defekt-Engineering“ (ADDE)** ihre Fortsetzung. Das Projekt wird im Rahmen der Landesexzellenzinitiative Sachsen als eines von fünf Großprojekten über die Jahre 2009 bis 2014 mit einer Gesamtsumme von 20 Mio. Euro gefördert (Leitung: Prof.

David Rafaja, Institut für Werkstoffwissenschaft). Im Jahr 2012 endete nach positiver Bewertung durch externe Gutachter sowie Vertreter des SMWK die 1. Arbeitsphase mit Schlussberichten zu den einzelnen Teilprojekten. Im Laufe des Jahres wurden von der Sächsischen Aufbaubank Folgeanträge mit einem Volumen von insgesamt 5,1 Millionen € bewilligt. Im Großprojekt ADDE kooperieren in insgesamt sieben Teilprojekten 18 Wissenschaftler und 64 Mitarbeiter aus 14 Instituten der Universität. Außerdem sind das Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf und das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden beteiligt. Entwickelt werden moderne Hochleistungswerkstoffe für Bereiche wie Kommunikation, Mobilität, Energie und Umwelt, darunter auch spezielle Materialien für die Photovoltaik und die Mikroelektronik.

Beträchtliche Mittel vom Freistaat Sachsen und aus dem Europäischen Sozialfonds warb die TU Bergakademie Freiberg u. a. zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses ein. Mit einer Finanzierung im Rahmen der Richtlinie Hochschule und Forschung nahmen drei Nachwuchswissenschaftlergruppen auf den Gebieten Geobiotechnologie, Pyroelektrische Funktionsmaterialien und biogene Kraftstoffe für Motoren 2012 ihre Arbeit auf; drei weitere wurden bewilligt. Zum Jahresende 2012 arbeiteten an der TU Bergakademie Freiberg insgesamt fünf Nachwuchsforschergruppen (2013 starteten noch drei weitere) an ihren Vorhaben.

Die Freiburger Ressourcenforschung wurde 2012 maßgeblich auch mit Bundesmitteln, insbesondere über Programme der Hightech-Strategie, gefördert. Finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) starteten an der TU Bergakademie Freiberg 2012 zwei Vorhaben im Rahmen der Fördermaßnahme „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“. Im Zuge des Projekts **„SMSB – Gewinnung strategischer Metalle und anderer Mineralien aus sächsischen Bergbauhalden“** werden Aufschüttungen auf sächsischem Gebiet auf ihren Inhalt an strategischen Metallen hin untersucht. Das mit 0,9 Mio. Euro geförderte Projekt steht unter der Leitung des Lehrstuhls für Lagerstättenlehre und Petrologie,

unterstützt vom Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. In einem zweiten **Projekt „PhytoGerm“** wird untersucht, wie das Metall Germanium, wenn es sich in Pflanzen angereichert hat, gewonnen werden kann. Für das von den Instituten Biowissenschaften und Technische Chemie gemeinsam mit externen Partnern in Angriff genommene Projekt bewilligte das BMBF 1,2 Mio. Euro. Im Rahmen des Förderprogramms des BMBF „Validierung des Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung – VIP“ begannen im Oktober 2012 die Arbeiten am **Projekt CryPhysConcept**. Mit einem Budget von ca. 3,6 Mio. Euro wird bis Ende 2015 unter Leitung des Instituts für Experimentelle Physik zu Fragen elektrochemischer Energiespeicher gearbeitet. Im Rahmen der BMBF-Ausschreibung Forschungscampus wurden der TU Bergakademie Freiberg zwei Projekte auf dem Gebiet der High-Tech-Metalle bewilligt (insgesamt ca. 1,56 Mio. Euro). Weitere Vorhaben, gefördert aus Mitteln des Bundes, starteten 2012 auf den Gebieten solar-chemische Speicher, Entwicklung von Katalysatoren, Geothermie-Reservoirs und verbesserte Feuerfestmaterialien.

Laufende Projekte widmen sich u. a. neuen Technologien zur Energieeffizienz bei industriellen Prozessen und der Rückgewinnung von Wertstoffen. Im Rahmen des vom BMBF als „Zentrum für Innovationskompetenz“ und dem Land Sachsen geförderten Projekts „Virtuhcon“ (Laufzeit 2009–2014/15) erforschen Wissenschaftler aus acht Instituten der TU Bergakademie Freiberg gemeinsam mit internationalen Nachwuchswissenschaftlern Hochtemperatur-Konversionsprozesse. 2012 etablierte sich das „Deutsche Energierohstoffzentrum“ (DER) weiter als Zentrum für Forschung und Entwicklung im Bereich der stofflich-energetischen Nutzung von Kohle und Biomasse. Zum „DER-Tag“ am 19./20. November 2012 wurden nach drei Jahren Projektlaufzeit erzielte Ergebnisse präsentiert. Das Projekt wird als eines von elf im BMBF-Programm „Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Bundesländern“ gefördert. Neben sechs in Freiberg ansässigen Forschungsinstituten sind vier weitere nationale Forschungseinrichtungen sowie Partner aus der Energiewirtschaft beteiligt, u. a. MIBRAG, ROMONTA, VATTENFALL.

Im Jahr 2012 wurden an der TU Bergakademie Freiberg insgesamt zehn

Projekte mit einer Förderung aus dem 7. Forschungsrahmenprogramm der EU, davon neun in der Verbundforschung und eines im Mobilitätsprogramm Marie Curie, bearbeitet. Herausragend war unsere Universität im Themenbereich Energie engagiert.

Die TU Bergakademie Freiberg behauptete auch 2012 ihre Position unter den führenden technischen Universitäten Deutschlands bei der Einwerbung von Forschungsdrittmitteln pro Professor (2012: 616 T€; 2011: 572 T€; 2010: 548 T€). Mit insgesamt 53,6 Mio. € Drittmiteinnahmen für 2012 hielt sie ihre Einwerbungen auf dem über die letzten Jahre erreichten hohen Niveau (vgl. 2011: 50,3 Mio. €; 2010: 46,1 Mio. €; 2009: 51,1 Mio. €). Der Anteil der Drittmittel entspricht damit seit Jahren in Folge in etwa dem der staatlich finanzierten Haushaltsmittel. Im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) herausgegebenen „Förderatlas 2012“, der den Zeitraum 2008–2010 abdeckt, erscheint die TU Bergakademie Freiberg unter den 40 drittmittelaktivsten Hochschulen deutschlandweit. Sie belegt den zweiten Platz im Bereich der Werkstofftechnik mit 13,2 Mio. € an eingeworbenen Drittmitteln. Innerhalb der Universität trugen, wie in den Vorjahren, die Profildomänen Material und Energie/Verfahrenstechnik besonders stark zum Drittmittelaufkommen bei.

KOOPERATIONEN

Auch 2012 waren die Freiburger Halbleiterunternehmen (Deutsche Solar GmbH, Freiburger Compound Materials GmbH, Siltronic AG) und Metallbetriebe (u. a. Bharat Forge Aluminiumtechnik GmbH & Co. KG Brand-Erbisdorf, BGH Edelstahl Freital GmbH, Nickelhütte Aue) die wichtigsten Industriepartner am Standort Freiberg und in der Region. Mit ihnen wird vornehmlich in den Profildomänen Energie und Material kooperiert. Weitere Industriekooperationen betreffen die Bereiche Geo und Umwelt. Unter den Partnern sind zahlreiche führende Unternehmen der Großindustrie (z. B. E.ON Energie AG, München; RWE Power, Lurgi AG, Frankfurt/M.; Vattenfall Europe AG, Cottbus; Siemens AG).

Nachdem Ende August 2011 das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) als gemeinsame Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf und der TU Bergakademie Freiberg gegründet worden

war, gab es 2012 eine enge Zusammenarbeit bei gemeinsamen Forschungsinitiativen. So erfolgte die Antragstellung im Programm des BMBF-Programms „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ gemeinsam; das HIF koordiniert den für die Durchführung des Vorhabens gebildeten Forschungsverbund im Integrations- und Transferprojekt INTRA r³+

INVESTITIONEN

Die Gesamtinvestition der TU Bergakademie Freiberg für Forschungs-großgeräte im Jahr 2012 belief sich auf 6,32 Mio. Euro und war damit geringer als in den Vorjahren (2011: 9,86 Mio. Euro; 2010: 11,21 Mio. Euro). Nachdem am Universitätsrechenzentrum im November 2011 ein neuer zentraler HPC-Cluster als Hochleistungsrechner für die Wissenschaft in Betrieb gegangen war, wurde im März 2012 ein neuer zentraler Fileserver erfolgreich installiert (Typ FAS 3270, Firma Netapp, nutzbare Speicherkapazität 800 TeraByte). Das Speichersystem dient u. a. zur Bereitstellung der zentralen Homeverzeichnis für alle Mitarbeiter und Studenten sowie von Speicherplatz für das zentrale HPC-Cluster.



ECKARDT WILDNER

Am Institut für Metallformung wurde Ende März 2012 eine neue Universal-Umformpresse eingeweiht. Die Anlage ermöglicht die Herstellung von Bauteilen aus Stahl- und Nichteisenmetalllegierungen für die Industrie im Größenbereich ab einer normalen Schraube bis hin zu einem Flugzeugteil von bis zu 500 Kilogramm Masse. Die Mittel für die 2,33 Mio. Euro teure Gesamtinvestition wurden zu zwei Dritteln von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und vom Land Sachsen bereitgestellt.

Für den Neubau eines Laborgebäudes der chemischen Institute der Fakultät für Chemie und Physik (Fakultät 2) wurde im Juni 2012 der Grundstein gelegt. Die

nach Abschluss des Neubaus ab 2014 verfügbare moderne und hochspezialisierte Laborausstattung wird den Ausbau bedeutender Forschungsfelder, wie der Silizium- und Lithiumforschung für die Halbleiter- und Automobilindustrie, ermöglichen und weitere Kooperationen mit der Wirtschaft sichern. Die Investition in Höhe von 20 Mio. Euro basiert auf Mitteln der Europäischen Union und des Landes Sachsen.

Am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau wurde im Herbst 2012 ein Tropfenkonturanalyse-System DSA 100 (Firma KRÜSS GmbH) installiert. Damit können die Methoden der Erdölförderung noch eingehender erforscht und tiefere Erkenntnisse zu den Möglichkeiten der Erhöhung des Förderausbringens aus einer Lagerstätte und zur kostengünstigeren Gewinnung von Erdöl gewonnen werden.

An der Universitätsbibliothek wurden 2012 die elektronischen Medienangebote weiter ausgebaut, insbesondere durch die Umstellung weiterer Zeitschriften von Print auf Online. Zudem ermöglicht es die Inbetriebnahme der Online-Fernleihe den BenutzerInnen, den Bearbeitungsstatus ihrer Fernleihen online einzusehen.

GLEICHSTELLUNG

Im April 2011 war ein neues, umfassendes Gleichstellungskonzept als Leitpapier für eine systematischere Förderung der Gleichstellung der Angestellten an der gesamten Universität verabschiedet worden. In Orientierung an den darin formulierten sechs Handlungsfeldern wurden 2012 unterschiedliche Maßnahmen der Fakultäten und zentralen Einrichtungen geplant und umgesetzt. Dafür wurde auf Antrag eine finanzielle Unterstützung aus dem zentralen Gleichstellungsbudget gewährt, die je nach Kostenhöhe seitens der Beantragenden zu ergänzen war. Schwerpunkt war die Unterstützung von Promotionsvorhaben, für die in 21 Fällen die Finanzierung von Überbrückungszeiten oder von Personal bewilligt wurde. Dies ist im Einklang mit der Zielvorgabe im Gleichstellungskonzept, das u. a. vorsieht, dass bis 2020 40 Prozent der erfolgreich abgeschlossenen Promotionen auf Frauen entfallen. Zur Unterstützung einer weiterführenden Qualifizierung über die Promotion hinaus wurde 2012 das Mary-Hegeler-Stipendium für Habilitandinnen und weibliche Postdocs neu eingerichtet.



TORSTEN MATER

ERGEBNISSE IN DER LEHRE

Projektstart MESIOR („Dritte Säule Hochschulpakt“)

Im Jahr 2012 wurden an der Bergakademie die im Rahmen des Projekts MESIOR (Maßnahmen für erfolgreiches Studieren an einer international orientierten Ressourcenuniversität) bewilligten Arbeitspakete weitergehend ausgeführt. Der Universität war es 2011 gelungen, mit ihrem Antrag beim Wettbewerb innerhalb des Bund-Länder-Programms für bessere Studienbedingungen und mehr Qualität in der Lehre („Dritte Säule Hochschulpakt“) über 7,5 Millionen Euro einzuwerben. Diese Mittel sollen innerhalb von fünf Jahren vorrangig dafür eingesetzt werden, das Studienangebot gezielt weiterzuentwickeln und den Anteil von Absolventen in den MINT-Fächern zu erhöhen. Erreicht werden soll dies durch die Senkung der Zahl der Studienabbrecher, die Verkürzung der Studiendauer und die Gewinnung von mehr weiblichen sowie qualifizierten internationalen Studierenden für die ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge. Mit dem Projekt wurde insbesondere die personelle Ausstattung für die Fakultäten und zentrale Einrichtungen verbessert: Insgesamt können dadurch 36 Mitarbeiter in Voll- und Teilzeit finanziert werden. Außerdem werden Mittel für studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte sowie Sachmittel für Lehrveranstaltungen bereitgestellt.

Steigende Attraktivität des Studiums in Freiberg

Zum Wintersemester 2012/2013 wurden drei neue Studiengänge an der Bergakademie gestartet, die auf einen Berufs-

einstieg in einschlägige Zukunftsbranchen – wie in die Rohstoffindustrie oder in die Energiewirtschaft – ausgerichtet sind. So bereitet der neue Diplomstudiengang „Betriebswirtschaftslehre für die Ressourcenwirtschaft“ seine Studierenden auf einen Einsatz bei Energie-, Gas- oder Bergbauunternehmen vor. Außer für die klassischen betriebswirtschaftlichen Bereiche, wie Produktion und Logistik, Marketing oder Rechnungswesen, erhalten die Studierenden hier auch Einblicke in spezielle Fächer wie Unternehmensethik oder Corporate Social Responsibility. Eine Besonderheit des Studiengangs ist das „Kolleg Ressourcenwirtschaft“, in dem Studierende höherer Semester den fachbezogenen Diskurs üben können.

Der neue Bachelorstudiengang „Energietechnik“ verbindet Studieninhalte aus dem Maschinenbau, der Verfahrens- und der Elektrotechnik. Als Vertiefungsrichtungen können die Studierenden u. a. Industrielle Energie- und Kraftstoffwirtschaft, Elektroenergieversorgung oder Elektro- und Verbrennungskraftmaschinen wählen. Im ebenfalls im Herbst 2012 gestarteten internationalen, englischsprachigen Masterstudiengang „Advanced Mineral Resources Development“ erwerben die Studierenden Kompetenzen, die sie befähigen sollen, nachhaltige und umweltverträgliche Methoden für den Bergbau und die Bergbausanieerung unter zweigspezifischen betriebswirtschaftlichen Aspekten zu entwickeln. Im Rahmen dieses Dreiländer-Gemeinschaftsprojekts verbringen die Studierenden das erste Semester an der österreichischen Montanuniversität Leoben, das zweite in Freiberg und das



dritte an der nationalen Bergbauuniversität im ukrainischen Dnepropetrowsk.

Die 2011 im Zuge von MESIOR ergriffenen Einzelmaßnahmen zur Steigerung der Attraktivität des Studienangebots wurden weitergeführt. Auch im Jahr 2012 wurden zahlreiche Anstrengungen unternommen, die bewirken sollen, noch mehr Studierende zu einem zügigen und erfolgreichen Studienabschluss zu führen. Aus Mitteln des MESIOR-Projekts wurde die Finanzierung von Wissenschaftlichen Mitarbeitern für die Unterstützung der Lehre und die Betreuung von Studierenden – insbesondere in den Grundlagenfächern – fortgesetzt. Damit war es möglich, kleinere Übungsgruppen zu bilden und Grundlagenveranstaltungen,

die bislang von heterogenen, größeren Hörergruppen belegt worden waren, den spezifischen Bedürfnissen der einzelnen Gruppen anzupassen, also nach Studienrichtungen zu differenzieren. Dazu analysierte man an der Fakultät für Mathematik und Informatik schulische Lehrpläne und passte darauf aufbauend die Grundlagenvorlesung „Höhere Mathematik für naturwissenschaftliche Studiengänge“ an einigermaßen gesicherte bzw. noch fehlende Vorkenntnisse an. Zur besseren Studienvorbereitung wurde ein Mathematik-Intensivkurs für Studienanfänger eingerichtet. An dem zweiwöchigen Pilotkurs zu Beginn des Wintersemesters 2012/2013 nahmen ca. 600 Studienanfänger teil. Parallel dazu

wurde die Mathematik-Broschüre „Keine Angst vor Zahlen! Die Mathematik in Deinem Studium“ veröffentlicht. Das Heft informiert Schüler und Lehrer über die Rolle der Mathematik in natur-, ingenieur- sowie wirtschaftswissenschaftlichen Studiengängen.

Im Rahmen des MESIOR-Projekts wurden am Internationalen Universitätszentrum Fachsprachenlehrer für Deutsch und Englisch sowie ein zusätzlicher Betreuer und Berater für ausländische Studierende beschäftigt. Auf dieser Basis hatte man die Möglichkeit, die Intensivkurse zur Studienvorbereitung ausländischer Studienbewerber, studienbegleitende Deutschkurse, Sprach- und Orientierungskurse in der Semesterpause anzubieten sowie die Englisch-Fachsprachenkurse weiter auszubauen.

Eine neu geschaffene sog. E-Learning-Koordinationsstelle des Universitätsrechenzentrums am Medienzentrum unterstützt als zentrale Service-Einrichtung in allen Fragen rund um Didaktik, Technik und Recht des E-Learning diese Bemühungen. Eine Medienpädagogin und ein Medientechniker entwickelten ein E-Learning-Grobkonzept und einen Nutzerservice für OPAL/E-Learning-Tools sowie Dienste, Schulungs- und Werbematerial für Studierende und Lehrende und führten Schulungen durch. Die Angebote der E-Learning-Koordinationsstelle stießen bereits in der Anlaufphase auf große Resonanz bei Lehrenden und Studierenden. Mit dem Ausbau des E-Learnings an der Bergakademie möchte die Prorektorin für Bildung auch die Installation berufs begleitender Studienangebote erleichtern. Sie engagiert sich zudem für eine kontinuierliche Weiterentwicklung fachübergreifender Lehrangebote. Diese sollen unter Beachtung individueller Zeitpläne auf die jeweilige Ausbildungssituation [-station?] zugeschnitten und untereinander abgestimmt sein. In diesem Sinne wurden zusätzliche Lehrangebote der Bergakademie unter der Dachmarke *proWissen* gebündelt. Unter dieser Überschrift haben Career Center, Graduierten- und Forschungsakademie, Internationales Universitätszentrum, die Sammlungen der Bergakademie, SAXEED, Studium generale, Universitätsbibliothek und Universitätsrechenzentrum ihre Programme in einer gemeinsamen Broschüre zusammengefasst. Die Bündelung soll zukünftig weiterentwickelt werden – hin zu einer „Virtuellen Fa-



kultät proWissen“. Mit der Einrichtung dieser Fakultät wird die Universität ihre Bildungsangebote gezielt ausbauen.

Die Bergakademie entwickelt neue Veranstaltungsformate, die die Studierenden an Themenkreise heranführen, die über die normalerweise vermittelten Fachinhalte hinausgehen. So wurde eine Podiumsdiskussion organisiert, die sich mit technikethischen Fragen im Kontext von Unglücksfällen beschäftigt. Im Rahmen dieser Diskussion hatten die Besucher die Möglichkeit, sich u. a. per Laptop aktiv an der laufenden Debatte zu beteiligen. Am Beispiel der Umweltkatastrophe auf der Bohrinself „Deepwater Horizon“ sollte den Teilnehmern verdeutlicht werden, dass ihre Entscheidungen nicht nur auf technischen, sondern auch auf ethischen, sozialen oder wirtschaftlichen Erwägungen beruhen müssen. In diesem Fokus stand auch ein Vortrag des Schriftstellers Christoph Hein. Der namhafte Autor sprach zum Thema „Ressourcen und Demokratie“ und ging u. a. auf die Auswirkungen „unseres unersättlichen Hungers“ auf die begrenzten Ressourcen der Erde ein.

Deutschlandstipendium

Das nationale Stipendienprogramm hat sich an der Bergakademie bereits fest etabliert. Mit dem Stipendium sollen besonders begabte Studienanfänger und Studierende gefördert werden, deren bisheriger Werdegang herausragende Leistungen in Studium und Beruf erwarten lässt. Bei der Auswahl der Stipendiaten werden neben den schulischen bzw. Studienleistungen auch besondere Erfolge, Berufserfahrung, gesellschaftliches Engagement sowie besondere persönliche oder familiäre Umstände berücksichtigt. Ein Deutschlandstipendiat erhält eine monatliche Zuwendung von 300 Euro. Während der Bund eine Hälfte dieses Betrags beisteuert, wird die andere Hälfte

durch die Hochschule von privater Seite her akquiriert. Im Jahr 2012 erhielten 73 Freiburger Studierende ein solches Stipendium. Für sie konnten 28 – überwiegend private – Förderer gewonnen werden.

Die **Graduierten- und Forschungsakademie (GraFA)** der Bergakademie stellt als interdisziplinäre wissenschaftliche Einrichtung Angebote für alle Nachwuchswissenschaftler der Universität bereit. Im Jahr 2012 hat sich das Bildungs- und Beratungsprogramm dieser Kompetenzschule erfolgreich etabliert. Zahlreiche Veranstaltungen der Institution dienen der fachübergreifenden Kompetenzentwicklung zur Vorbereitung auf künftige leitende bzw. wissenschaftliche Aufgaben, der Entwicklung sowie dem Ausbau von Beziehungen zwischen angehenden Fachkräften und sächsischen Unternehmen und der Verbesserung der Einstiegschancen für akademische Fachkräfte in den sächsischen Arbeitsmarkt.

Die Veranstaltungen im Rahmen des Zertifikatprogramms des Hochschuldidaktischen Zentrums Sachsen (HDS) wurden ausgebaut und können nun von Lehrenden der Bergakademie vor Ort belegt werden. Im Juni 2012 startete das Projekt „Lehrpraxis im Transfer“, ein Verbundprojekt sächsischer Universitäten, das in enger Kooperation mit dem HDS umgesetzt wird. Ziele des Projekts sind es, Lehrende bei der Weiterentwicklung der Lehre und des Lernens zu unterstützen sowie den Transfer guter Lehrpraxis zwischen den sächsischen Universitäten zu fördern. Im Jahr 2012 waren die Hauptnutzer der Programme Promovierende der Bergakademie.

Der GraFA ist es gelungen, Fördermittel für das Projekt „Promovieren in Sachsen – International“, das in Kooperation mit der Universität Ůsti nad Labem umgesetzt wird, einzuwerben. Das Projekt „Erfolgsteam Junge Frauen an die Spit-

ze“ für Doktorandinnen wurde etabliert. Die GraFA führte einen Promovierendentag (Begrüßungsveranstaltung für neue Doktoranden und feierliche Verabschiedung der Promovierten) durch.

Das **Career Center** offeriert in den drei Kernbereichen Beratung, Training und Vermittlung mehrere Angebote, die dabei helfen, Studierende und Absolventen der Bergakademie gezielt und bedarfsgerecht auf ihre erste volle Erwerbstätigkeit vorzubereiten. Es organisierte die Firmenkontaktmesse im Rahmen der ORTE – DIE ORIENTIERUNGSMESSE im Januar, die mit 60 vertretenen Unternehmen auf starke Resonanz stieß, sowie im Juni erstmalig eine Firmenkontaktmesse, an der 30 Unternehmen mitwirkten. Das Career Center veranstaltete rund 40 Seminare und Workshops und bot fünf Freiburger Karrieregespräche an. Insgesamt nahmen rund 1.000 Studierende die Seminare, Workshops, Vorträge und Beratungen des Career Centers in Anspruch.

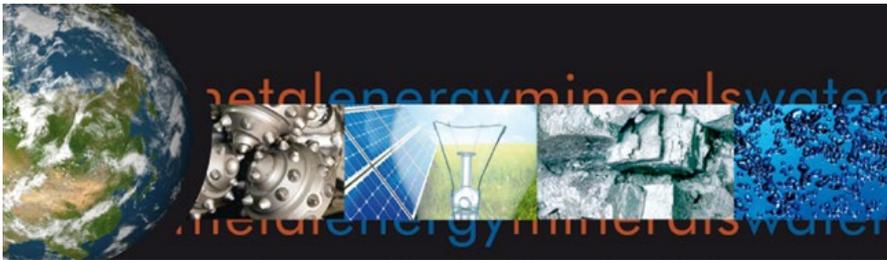
Qualitätssicherung

In jedem Semester werden Vorlesungen durch Studierende mittels Standard-Fragebögen bewertet. Die internationalen Masterprogramme „International Management of Resources and Environment“ und „International Business in Developing and Emerging Markets“ wurden erfolgreich akkreditiert, die UNiCert Fremdsprachenausbildung ebenfalls mit Erfolg reakkreditiert.

Die Beratungsangebote werden seit dem Wintersemester 2008/2009 durch ein vom Lehrstuhl für Marketing durchgeführtes Monitoring evaluiert. Die Ergebnisse dienen als Informationssystem und Entscheidungsgrundlage zur Optimierung der einschlägigen Hochschulaktivitäten. Dabei werden Erstsemestler zu ihren Studien- und Hochschulwahlentscheidungen sowie zu den in Anspruch genommenen Hochschulmarketingmaßnahmen befragt.

PERSONAL

Die sehr hohe Drittmittelquote wirkte sich auch 2012 wieder positiv auf die Personalentwicklung an der TU Bergakademie Freiberg aus. Die Zahl der drittmittelfinanzierten Mitarbeiter steigt seit Jahren kontinuierlich an. Im vergangenen Jahr waren an der Universität insgesamt 1.687 Mitarbeiter, davon 706 aus Drittmitteln finanzierte Personen, beschäftigt.



BAULICHE MAßNAHMEN

Im Jahr 2012 wurde eine Reihe von Baumaßnahmen fortgeführt bzw. neu begonnen. Zur Deckung des gestiegenen Flächenbedarfs für Lehre und Forschung sowie für die Sicherung und Schaffung guter Arbeits- und Studienbedingungen erweisen sich jedoch weitere Baumaßnahmen als notwendig, für die vorerst nur Planungen vorliegen (z. B. Neubau Bibliothek/Hörsaalzentrum).

Weitere Baumaßnahmen, wie am Schloßplatzquartier, verzögerten sich. Zu den laufenden großen Baumaßnahmen 2012 zählten:

- Sanierung und Umbau Institutsgebäude Formgebung
- Neubau eines Laborflügels am Clemens-Winkler-Bau
- Schloßplatzquartier, bauvorbereitende Arbeiten/archäologische Grabungen

PRESSE, MARKETING UND STUDIENBERATUNG

2012 wurde der Aufgabenbereich Presse- und Öffentlichkeitsarbeit umstrukturiert. Der Bereich Pressearbeit/Kommunikation, einschließlich der zentralen Webredaktion, arbeitet seit 1. April 2012 als Stabstelle Presse des Rektorats. Die Abteilung Marketing und Studienberatung ist dem Dezernat für Studium, Forschung und Öffentlichkeitsarbeit zugeordnet. Für die Tätigkeit der beiden Bereiche wurden für 2012 u. a. folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Presse- und Medienarbeit einschließlich Strategie,
- Webredaktion für die zentralen Seiten der Homepage, Gewährleistung der Aktualität des web-Auftritts und ständige Aktualisierung,
- Medienberatung für Hochschulangehörige (Serie im Uni-Newsletter),
- Konzeption der Imagebroschüre „Ressourcen für die Zukunft“, dt., engl., russ.,
- Konzeption und Erstellung des neuen Uni-Newsletters (3 Ausgaben 2012).

Herausragender veranstaltungsorganisatorischer Höhepunkt war die Vorbereitung und Ausrichtung der Gründung des „Weltforums der Ressourcenuniver-



sitäten für Nachhaltigkeit“ am 11. Juni 2012. Die Teilnehmer von 53 Universitäten aus 40 Ländern erlebten einen würdigen, professionell vorbereiteten Rahmen für diese im bundesweiten Maßstab einmalige Initiative der TU Bergakademie mit überregionaler und internationaler Ausstrahlung.

Ziele der Arbeit der Studienberatung und des Studierendenmarketings sind die Gewinnung von Studieninteressenten und die Verbesserung der Qualität von Studienergebnissen. Die Zentrale Studienberatung (ZSB) – Teil des Informations- und Beratungsnetzes der TU Bergakademie für Studieninteressierte und Studienanfänger – kooperiert eng mit zahlreichen Einrichtungen und Personen innerhalb und außerhalb der Universität und vermittelt den Fakultäten und dem Rektorat wichtige Informationen, die es braucht, um Entwicklungen und Veränderungen bei Fragen, Bedürfnissen und Problemen von Studieninteressierten und Studierenden frühzeitig zu erkennen. Der Bereich Studierendenmarketing hat den Fakultäten einen „Werkzeugkasten Studierendenmarketing“ vorgestellt. Dabei handelt es sich um Marketing-Maßnahmen, mit denen die einzelnen Fakultäten, Institute oder auch Studiengänge selbst ihr Studienangebot nach außen vor Schülern und Studieninteressierten bewerben können. Unterstützt wurde die Arbeit der ZSB von 16 Studienbotschaftern, die im Jahr 2012 an ihrer alten Schule unsere Universität vorstellten.

STIFTUNGEN

Für Lehre und Forschung an der TU Bergakademie Freiberg sind Stiftungen von ganz erheblicher Bedeutung.

Stiftung „Technische Universität Bergakademie Freiberg“

Zweck der Stiftung „Technische Universität Bergakademie Freiberg“ ist die

Förderung der Lehre und Forschung an der Universität. Stiftungsmittel erlauben es, die personelle und materielle Absicherung der Lehre und Forschung, die Gewinnung von Wissenschaftlern sowie von Spezialisten aus der Wirtschaft des In- und Auslands massiv zu unterstützen.

Mehrere Stiftungsfonds, wie der Hermann-Spamer-Stiftungsfonds, der die Kinder- und Sommeruniversität unterstützt, der SolarWorld-Stiftungsfonds, der die Fakultät für Chemie und Physik in Lehre und Forschung fördert, der Stiftungsfonds Ursula und Prof. Dr. Wolf-Dieter Schneider, der die Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften stimuliert, und der FME-Stiftungsfonds, der Arbeiten auf dem Gebiet der Industriearchäologie unterstützt, ermöglichen das Setzen starker Anreize für die wissenschaftlichen Aktivitäten. Ein Höhepunkt der gezielten Förderung durch die Marianne-und-Frank-Michael-Engel-Stiftung war im Juni 2012 die feierliche Einweihung und Schlüsselübergabe für das durch die Stiftung sanierte Gebäude des Instituts für Wissenschafts- und Technikgeschichte in der Silbermannstraße 2. Mit dem Umzug des Instituts haben sich die Bedingungen für dessen Arbeit deutlich verbessert.

Aus der letztgenannten Stiftung wurden im Jahr 2012 auch Mittel zur Verbesserung der Lehre mit dem Schwerpunkt Ausstattung von Praktika sowie für Maßnahmen zur Erhöhung der Quote weiblicher Studierender in den MINT-Fächern zur Verfügung gestellt.

Krüger-Stiftung

Zweck der Krüger-Stiftung ist primär die Förderung der praxis-, d. h. anwendungsbezogenen Wissenschaft und Forschung an unserer TU. Dabei wird angestrebt, besonders solche Forschungen zu fördern, die im Freistaat Sachsen – bevorzugt in Freiberg – in marktfähige Produkte umgesetzt und von hier aus verkauft werden können. Weiterere Stiftungszwecke waren bzw. sind der Aufbau und das Betreiben einer zusätzlichen Geowissenschaftlichen Sammlung in unserer Bergstadt.

Krüger-Forschungskolleg

Weitgehend abgeschlossen wurden im Jahr 2012 die bereits 2008 begonnenen Forschungsarbeiten im Freiburger Hochdruck-Forschungszentrum (FHP),



Das Krügerhaus am Schloßplatz

die über fünf Jahre als interdisziplinäres Projekt zur Materialforschung aus Mitteln der Dr. Erich-Krüger-Stiftung finanziert wurden. Im Rahmen der Ausschreibung für ein neues Krüger-Forschungskolleg wurden acht Anträge eingereicht. Zur Förderung ausgewählt wurde vom Vorstand der Krüger-Stiftung das Vorhaben „Biohydrometallurgisches Zentrum für strategische Elemente – Prozesskette zur Gewinnung von Metallen aus Erzen, Halden und Recyclingmaterial“. Ab 2013 wird mit zwölf Teilprojekten über eine Laufzeit von fünf Jahren mit einem Gesamtbudget von 5,7 Mio. Euro der Aufbau einer solchen Prozesskette – zunächst für die Elemente Indium und Germanium – angestrebt.

Krüger-Haus

Das Krüger-Haus am Schloßplatz 3 in Freiberg ist der Sitz der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung. Das 500 Jahre alte Gebäude war 2004 durch Dr. Peter Krüger erworben worden. Nach der Sanierung übergab Erika Krüger das Gebäude an die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung der TU Bergakademie Freiberg zur Nutzung. In diesem Gebäude präsentiert die TU Bergakademie Freiberg in Ergänzung zur terra mineralia eine Dauerausstellung von Mineralien aus deutschen Fundorten, leihweise überlassen von der Pohl-Ströher-Mineralienstiftung, den Geowissenschaftlichen Sammlungen der

TU Bergakademie Freiberg, der Stiftung „Mineralogische Sammlung Deutschland“ sowie von privaten und musealen Leihgebern. Die Krüger-Stiftung unterstützt zudem die Krüger-Kolloquien, die 2010 ins Leben gerufen wurden und auf denen renommierte Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik zu aktuellen Themen referieren. Im Jahr 2012 diskutierten z. B. Prof. Onno Oncken (Deutsches Geoforschungszentrum Potsdam) und Prof. Jörg Matschullat zum Thema „Zukunfts Herausforderungen aus der Perspektive der Geowissenschaften“.

INTERNATIONALISIERUNG

Im Jahr 2012 bestanden 36 internationale, interuniversitäre Kooperationsvereinbarungen, 17 Verträge auf Fakultäts- und Institutsebene sowie 37 Memoranden of Understanding. Im Jahr 2012 wurden zwölf weitere Vereinbarungen mit Hochschulen weltweit geschlossen, z. B. mit der University of Akita, Japan, der Bergbauuniversität Hanoi, Vietnam, der Universidad do Rio Grande do Sul in Porto Alegre, Brasilien, ein MoU mit der Polytechnic of Namibia, Windhoek, sowie Vereinbarungen zum Studentenaustausch bzw. zu Doppelpromotionen mit der Universidad do Rio Grande do Sul in Porto Alegre, Brasilien, der University of Akita, Japan und der Pridniprovskia Staatlichen Akademie

für Bauwesen und Architektur, Dnepropetrovsk, Ukraine. Eine Übersicht zu den internationalen Partnern der TU Bergakademie Freiberg bzw. zu den Auslandsbeziehungen der Fakultäten pflegt das Internationale Universitätszentrum auf seiner Website. Zudem aktualisiert das IUZ regelmäßig die Aufstellung der internationalen Kooperationen unserer Hochschule im Hochschulkompass der HRK (www.hochschulkompass.de). Für die Realisierung internationaler Projekte von Wissenschaftlern und Studierenden unserer Hochschule warb 2012 allein das IUZ Drittmittel in Höhe von 490.869 € ein und bewirtschaftete diese für alle Fakultäten. Zu den Mittelgebern gehören DAAD, EU, SMWK sowie Firmen wie die VNG AG sowie der Verein der Freunde und Förderer der Bergakademie. Die Förderung vollzog sich im Rahmen folgender Programme: PROFIN (Förderung der Integration ausländischer Studierender), Ostpartnerschaften, ERASMUS Organisation/Mobilität, ERASMUS Lokale Erasmus-Initiative, Stipendien- und Betreuungsprogramm (STIBET), DAAD Matching Funds Programm, Brasilianisches Stipendienprogramm CsF-Alemanha, PROMOS-Stipendien für Studien im Ausland, DAAD-Preis für hervorragende Leistungen ausländischer Studierender, Tutoren für mongolische Stipendiaten, Agricola-Stipendien für Studenten aus den MOE, VNG-Campus Kooperation und Sommerschule „Erneuerbare Energien“. Finanziert wurden mit den eingeworbenen Mitteln Forschungs- und Lehraufenthalte deutscher und ausländischer Wissenschaftler. Studierende partizipierten von Studienstipendien, Auslandsexkursionen, Sommerschulen, von Fachworkshops und Konferenzen. Ferner konnten Integrations- und Betreuungsmaßnahmen für ausländische Studierende, Doktoranden und Gastwissenschaftler gefördert werden.

Seit dem WS 2012/13 finden sich an der TU Bergakademie sechs internationale Masterstudiengänge: International Management of Resources and Environment (IMRE), International Business in Developing and Emerging Markets (IBDEM), Computational Materials Science (CMS), Ground Water Management, Geoscience und Advanced Mineral Resources. Mit Advanced Mineral Resources gibt es einen im WS 2012/13 eingeführten trinationalen Studiengang.

Die TU Bergakademie bietet in mehreren Studiengängen ein Studium mit

Doppelabschluss in Kooperation mit ausländischen Partnerhochschulen an. So offeriert z. B. die Fakultät für Wirtschaftswissenschaften Programme mit Hochschulen in West- und Osteuropa sowie in Asien. Die meisten der hierfür immatrikulierten ausländischen Studenten studierten in den Bereichen der Werkstoff- bzw. der Wirtschaftswissenschaften.

Neue Kooperationsprogramme wurden 2012 mit folgenden Universitäten vereinbart: Pridniprovska Staatliche Akademie für Bauwesen und Architektur, Ukraine (Doppeldiplom), Wirtschaftsuniversität Poznan, Polen (Doppelmaster), Wuhan University of Science and Technology, China (Doppelmaster), China University of Geosciences Beijing, China (Doppelmaster), Montanuniversität Leoben, Österreich, und Bergbauuniversität Dnepropetrovsk, Ukraine (Trinationaler Studiengang). Im Rahmen des ERASMUS-Programms bestanden 2012 bilaterale Abkommen mit 84 europäischen Hochschulen zum Studenten- und Dozentenaustausch. Außerdem gibt es Austauschprogramme mit Universitäten in Nord- und Südamerika sowie in Asien.

Sommerschulen und Kompaktkurse sind wirkungsvolle Instrumente zur Verbesserung der internationalen Kooperation und zur Außendarstellung der Hochschule. Die Internationale Sommerschule „On the Cutting Edge of Sustainable Energy Supply“, die vom Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik und vom Internationalen Universitätszentrum ausgerichtet wird, fand 2012 zum neunten Mal statt. Kompaktkurse im Rahmen bestehender Partnerschaften sind beliebt, z. B. in den Bereichen Geoinformatik und Metallurgie in Kooperation mit der AGH Krakau. Einen ähnlichen, wechselseitigen Austausch gibt es auch unter den Nachwuchswissenschaftlern im Rahmen des Freiberg-St. Petersburger Kolloquiums am Rande des Freiburger Forschungsforums sowie bei Partnerveranstaltungen an der Bergbauuniversität St. Petersburg.

Im WS 2012/13 waren an der TU Bergakademie Freiberg 627 ausländische Studenten/Doktoranden immatrikuliert. Das entspricht einem Anteil von ca. 10,9% an der Gesamtstudentenzahl (5.772). Damit nahm die Zahl der ausländischen Studierenden weiter zu. Von den insgesamt 1.193 Studienanfängern im WS 2012/13 kamen 225 (also 18,9%) aus dem Ausland. Die zehn wichtigsten

Entsendeländer sind China, die Ukraine, die Mongolei, Vietnam, Russland, Indien, Iran, Irak, Polen und die Türkei.

Allen ausländischen Studierenden und Doktoranden bietet das IUZ ein Mentorenprogramm an, das die jungen Leute bei der Anreise, ggf. bei der Wohnungssuche, bei ersten Behördengängen und bei der Orientierung am Studienort bzw. in der Universität unterstützt. Das Sprachtandem-, das Sprachpaten- und das Sprachtutorenprogramm wurden auch 2012 fortgeführt. Letzteres bietet die Möglichkeit, wissenschaftliche Arbeiten oder Präsentationen von ehrenamtlich tätigen Muttersprachlern Korrektur lesen zu lassen.

Gut ist die Zusammenarbeit mit dem Studentenwerk und der Stadt Freiberg. Wie in jedem WS stellte das Studentenwerk ca. 80 Plätze für internationale Studierende zur Verfügung. Da der Bedarf wesentlich höher ist, finanzierten TU und Studentenwerk gemeinsam eine studentische Hilfskraft, die die internationalen Studierenden als Scout bei der Quartiersuche auf dem privaten Wohnungsmarkt unterstützt. 131 Studenten absolvierten ein durch das IUZ, IAESTE oder das LEONARDO-Büro Part Sachsen vermitteltes Auslandsstudium bzw. Auslandspraktikum. Die meisten Teilnehmer erhielten für ihren Auslandsaufenthalt eine Förderung aus dem ERASMUS-Programm. Zu weiteren Fördergebern bzw. -programmen zählen die Verbundnetz Gas AG, PROMOS und die DAAD-Ostpartnerschaften. Bevorzugte Zielländer im Rahmen des ERASMUS-Programms waren Norwegen (NTNU Trondheim), Italien (Trento) und Frankreich (Chambéry, Paris Est). Die Möglichkeiten, während des Studiums einen Auslandsaufenthalt zu absolvieren, werden – von einer geringfügigen Steigerung der Mobilitätszahlen abgesehen – nach wie vor von einem nur kleinen Teil der Studentenschaft wahrgenommen.

Nahezu alle Studiengänge haben mindestens vier SWS Fachsprachunterricht (i.d.R. Englisch) als obligatorischen bzw. wahlweise-obligatorischen Bestandteil der Ausbildung in die Studienordnung aufgenommen. Im Studienjahr 2011/12 bot das Fachsprachenzentrum Sprachkurse in 11 Fremdsprachen (Englisch, Französisch, Spanisch, Portugiesisch, Italienisch, Russisch, Polnisch, Tschechisch, Norwegisch, Japanisch und Chinesisch) an, die von über 2.000 Studierenden belegt wurden.

KOOPERATION MIT DER STADT

Auch 2012 kooperierte die Universität – insbesondere bei den Veranstaltungen im Rahmen des Stadtjubiläums – eng mit der Stadt Freiberg. Zu gemeinsamen Bauvorhaben zählen u. a. das Schloßplatzquartier und das Institutsgebäude für das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie an der Chemnitzer Straße. Letzteres wird voraussichtlich Ende 2013/Anfang 2014 bezugsfertig sein. Die enge Verbundenheit zwischen Universität und Stadt zeigt sich auch bei Aktionen für die Studentenschaft. Im WS 2012/13 begrüßte der Oberbürgermeister erneut ca. 100 neu eingeschriebene internationale Studierende. Alle Neueinschreiber können bei einem besonderen – nicht ganz ernst zu nehmenden – Vorstudium das Diplom fribergensis erwerben und lernen dabei Stadt und Universität kennen.

UNIVERSITÄTSJUBILÄUM

Im Jahr 2015 begeht die TU Bergakademie Freiberg ihr 250-jähriges Jubiläum unter dem Motto „Schätze heben“. Die Festperiode begann bereits 2012 mit verschiedenen Veranstaltungen, die sich u. a. dem Begriff der Nachhaltigkeit widmeten. Zu ihrer Vorbereitung wurde im Februar 2012 ein Jubiläumskomitee gegründet, bestehend aus Mitgliedern des Rektorats, des Senats, Dekanen und Ehrensensoren sowie Mitarbeitern der Abteilung Marketing und Studienberatung. Das Komitee wird grundlegende Entscheidungen zur Durchführung des Jubiläums treffen und die Aufgaben der einzelnen Arbeitsgruppen leiten und koordinieren. Das Jubiläum steht unter dem Patronat eines Festkuratoriums, dem herausragende Persönlichkeiten aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Kultur und Medien angehören. Die staatliche Schirmherrschaft übernahm Sachsens Ministerpräsident Stanislaw Tillich.

Der Rektor dankt allen Mitgliedern, Studentinnen und Studenten unserer Hochschule dafür, unsere Wertorientierung mit ihrem Einsatz und ihren Leistungen auch im vergangenen Jahr gestärkt zu haben. Grundlage für die Erfolge unserer Hochschule ist ihr persönliches Engagement. Sein Dank gilt auch den Alumni, den Partnern unserer Hochschule sowie ihren Freunden und Förderern für ihre Unterstützung. Optimistisch und voller Zuversicht für die weitere Entwicklung der TU Bergakademie werden wir die Universität – unseren hochgesteckten Ambitionen folgend – voranbringen.

Russisch-Deutsche Ressourcenuniversität soll Rohstoffkooperation stärken

Eine länderübergreifende Hochschulkooperation in Lehre und Forschung soll die deutsch-russische Zusammenarbeit in der Rohstoffwirtschaft stärken: Prof. Bernd Meyer, Rektor der TU Bergakademie Freiberg, stellte auf der 6. Deutsch-Russischen Rohstoff-Konferenz vom 16. bis 17. April im westsibirischen Chanty Mansysk vor Vertretern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft beider Länder das Projekt „Russisch-Deutsche Ressourcenuniversität (RUDERU)“ vor. In einer Abschlusserklärung verständigten sich die Teilnehmer darauf, die Technologiepartnerschaft von Wissenschaftlern beider Länder auszubauen und vor diesem Hintergrund die Gründung der Russisch-Deutschen Ressourcenuniversität zu unterstützen. Der Rektor betonte in seinem Beitrag die Bedeutung der deutsch-russischen Rohstoffkooperation für beide Länder: „Mit dem Projekt der gemeinsamen Rohstoff-Universität verfolgen wir das Ziel der Vereinigung des intellektuellen Potenzials unserer beiden Länder in der Technologie- und Rohstoffkompetenz auf internationalem Spitzenniveau“. Der Bayerische Ministerpräsident a. D., Dr. Edmund Stoiber, Mitglied des Präsidiums des Rohstoff-Forums, begrüßte dieses Projekt nachdrücklich: „Das Vorhaben der beiden ältesten Montanhochschulen der Welt in St. Petersburg und Freiberg zur Gründung einer Russisch-Deutschen Ressourcenuniversität ist eine ausgezeichnete Steilvorlage für den Ausbau der bilateralen Modernisierungspartnerschaft“.

Veranstalter dieser für die deutsch-russischen Beziehungen wichtigen Konferenz ist das Deutsch-Russische Rohstoff-Forum – eine Dialogplattform zur Entwicklung von Strategien für die effektive Nutzung fossiler, mineralischer und alternativer Rohstoff-Ressourcen. Es wurde am 10. Oktober 2006 im Beisein von Bundeskanzlerin Angela Merkel und des russischen Präsidenten Wladimir Putin von der TU Bergakademie Freiberg und dem St. Petersburger Staatlichen Bergbauinstitut (seit 2012: Nationale Universität für mineralische Ressourcen „Gorny“) – den ältesten Montanhochschulen der Welt – gegründet.

Qualitätssicherung in der Lehre

Ein Feedback durch unsere Studierenden

Silvia Rogler¹, Sylvie Preiss²

Qualität in der Lehre bedeutet für mich als Professorin: „Theoretische und praktische Inhalte, orientiert am aktuellen Stand der Forschung, so strukturiert zu vermitteln, dass Studierende das Fachgebiet überblicken und die gezeigten Methoden in der Praxis einsetzen können.“

Dieses an den Studierenden ausgerichtete Qualitätsverständnis ist aus der Hochschulgesamtsicht zu erweitern. Beispielsweise misst der Wissenschaftsrat die Qualität der Lehre daran, welche Ziele und Wirkungen mit Lehre und Studium jeweils verbunden sind und in welchem Maße diese Vorgaben erreicht und umgesetzt werden. Dabei fordert der Wissenschaftsrat [1] ein komplexes, multidimensionales und multifunktionales Qualitätsverständnis, das die vielfältigen Aspekte der Hochschulbildung berücksichtigt. Er geht davon aus, dass sich die unterschiedlichen Erwartungshaltungen der Studierenden, der Hochschullehrer, der Arbeitgeber, der Geldgeber, des Staates, der Politik sowie der Gesellschaft an Lehre und Studium nicht gegenseitig ausschließen müssen. Angesichts der Knappheit der personellen, zeitlichen und sachlichen Ressourcen, erachtet der Wissenschaftsrat auch Effektivität und Effizienz als für Lehre und Studium relevante Qualitätsmerkmale. Er siedelt die diesbezüglichen Anforderungen auf derselben Stufe an, wie das stetige Bemühen um die Reputation der Lehre. Die HRK [2] sieht die Qualität der Lehre zudem auch durch Beratungs- und Zusatzangebote bestimmt – sowie durch das Definieren allgemeingültiger Standards für die Rahmenbedingungen, unter denen die Studienprogramme und Prüfungssysteme umzusetzen sind. Jedes institutionalisierte Gremium, wie der Akkreditierungsrat oder die Kultusministerkonferenz, fügt weitere Kriterien hinzu.

In der Konsequenz ist für eine Prorektorin für Bildung unter Qualität der Lehre inhaltlich deutlich mehr zu beachten als für eine Hochschullehrerin in ihrem Lehrgebiet. Die *Abb. 1* soll einen Eindruck davon vermitteln, welche

Anforderungen an die Lehre an der TU Bergakademie Freiberg gestellt sind. Diese Anforderungen unterliegen zudem ständigen Änderungen. Das in der Abbildung lapidar als „Rahmenbedingungen“ Bezeichnete meint z. B. auch die Änderungen von rechtlichen oder politischen Gegebenheiten.

Alle Akteure im Bereich Lehre unternehmen große Anstrengungen, um die Qualität der Lehre zu steigern bzw. auf hohem Niveau zu halten. Dazu werden schon jetzt verschiedene Instrumente genutzt, wie die folgende Auflistung zeigt. Zur Qualitätssicherung in der Lehre werden sie kontinuierlich weiterentwickelt und ausgebaut.

Identifizierung und Gewinnung von Studierenden:

- Umfassende Studienberatung
- Studienmarketing
- Umsetzung des Pilotprojekts zum Self-Assessment 2013
- Aufbau eines Self-Assessments für alle Fakultäten bis 2016

Internes Monitoring der o. g. Instrumente durch Erstsemesterbefragung

Halten der Studierenden:

- Einrichtung/Änderung von Studiengängen folgen festen Verfahren, einschließlich studentischer Mitwirkung
- 14-tägige Intensivvorbereitungskurse: Mathematik erstmals im WS 2012/13 durchgeführt; Chemie neu WS 2013/2014
- Mentoren- und Tutorenprogramm
- Gute Lehre: „Julius-Weisbach-Preis“ für gute Lehre; hochschuldidaktische Kurse für Lehrende; regelmäßige Treffen mit Vertretern des Studentenrats zur Verbesserung der Studienbedingungen; Projekt „Lehrpraxis im Transfer“; Ausbau der Fallberatung für Lehrende (ab 2013); Facharbeitskreise (ab 2013); Ausschreibung „Lehr- und Lernprojekte“; Etablierung „Lernplattform“
- Bündelung und Sichtbarmachung der fachübergreifenden Lehrangebote in der „Virtuellen Fakultät“ (Pilotierung 2013)

Internes Monitoring der o. g. Instrumente durch

- Lehrberichte

1 Prof. Silvia Rogler, Prorektorin für Bildung

2 Dipl.-Kffr. Sylvie Heyne, Referentin der Prorektorin für Bildung

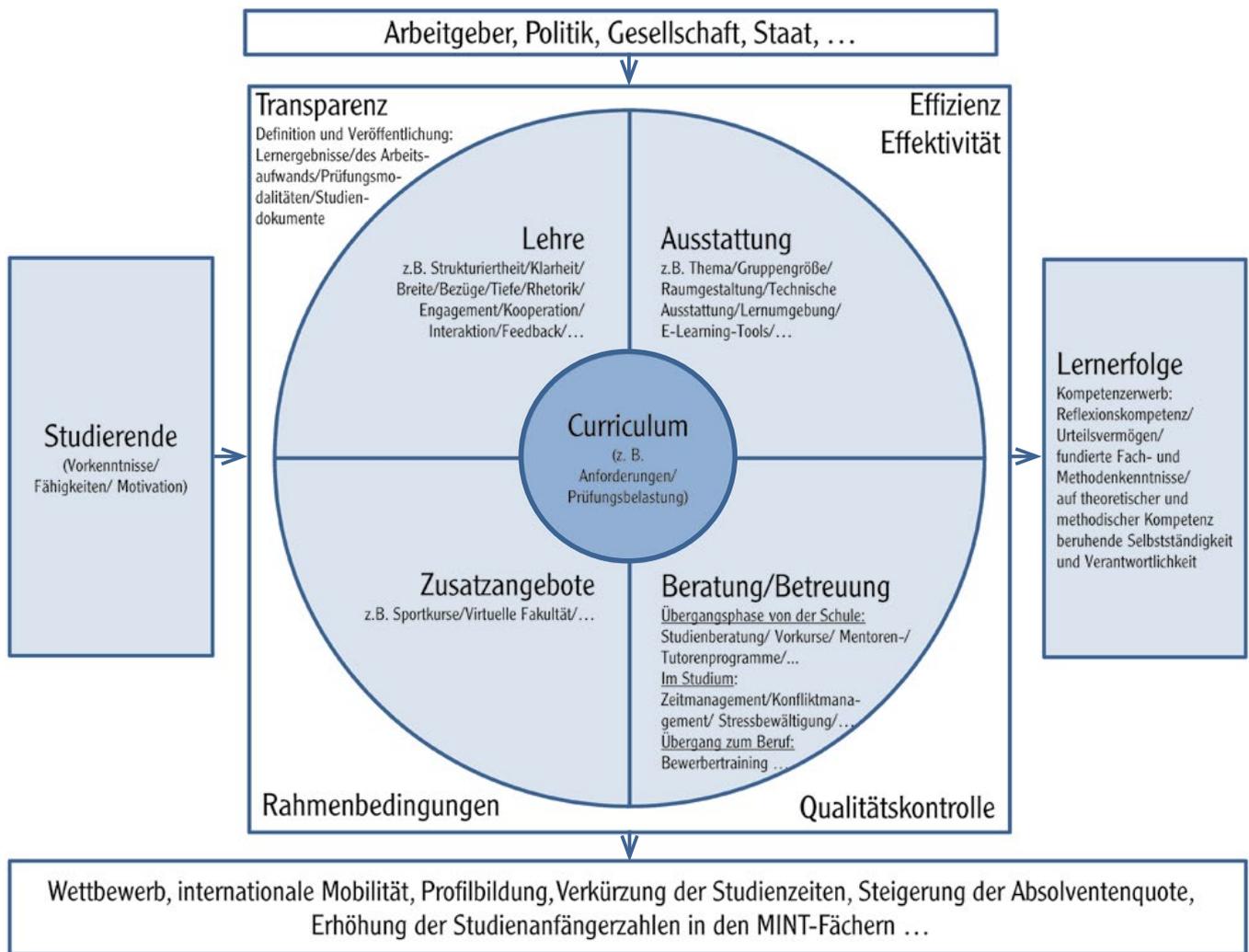


Abb. 1: Qualität der Lehre

- Studentische Evaluation der Lehre; pro Semester werden 100 bis 120 Lehrveranstaltungen evaluiert
- Studienverlaufsanalyse für ausländische Studierende
- Absolventenstudie, durch das Career Center durchgeführt

Externes Monitoring der o.g. Instrumente durch

- Programmakkreditierungen: Die Studiengänge „International Management of Resources and Environment“ und „International Business in Developing and Emerging Markets“ wurden erfolgreich akkreditiert.
- Partizipation an externen Rankings und Ratings: CHE-Rankings; Sächsische Absolventenstudien; Studienqualitätsmonitor (Hochschul-Informationssystem HIS für Hochschulforschung)

Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis:

- Richtlinie zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang

mit wissenschaftlichem Fehlverhalten an der TU Bergakademie Freiberg vom 2. Januar 2002

- Ständige Kommission zur Untersuchung von Vorwürfen wissenschaftlichen Fehlverhaltens, besetzt mit drei Hochschullehrern und einem wissenschaftlichen Mitarbeiter als stimmberechtigten Mitgliedern. Ein Vertrauensdozent und dessen Stellvertreter wirken als beratende Mitglieder mit.

Internes Monitoring des o.g. Instruments durch

- Einsatz von Software zur Erkennung von Plagiaten

Studienqualitätsmonitor:

In diesem Beitrag soll ein Aspekt der Qualitätssicherung in der Lehre herausgegriffen und vertiefend dargestellt werden: Im Jahr 2012 erhielt die TU Bergakademie Freiberg erstmals eine Auswertung zum Studienqualitätsmonitor. Sie gibt nicht nur einen guten Überblick über die Studienqualität und die

Studienbedingungen an der TU Bergakademie Freiberg aus Sicht der Studierenden, sondern zeigt auch, wo wir im Vergleich mit den anderen Hochschulen stehen. An der Studie nahmen deutschlandweit insgesamt 49.000 Studierende teil, darunter 498 von unserer Universität. Der Erhebungszeitraum der Studie waren die Monate Juni bis August 2012. Folgende Aspekte, positive wie negative sind hervorzuheben:

Überdurchschnittlich gute Beratung und Betreuung durch die Lehrkräfte:

Trotz der steigenden Arbeitsbelastung der Lehrenden fühlen sich unsere Studierenden überdurchschnittlich gut betreut und beraten. Am positivsten bewerteten die Ingenieurwissenschaftler die Beratung und Betreuung durch ihre Lehrkräfte.

Gute Studierbarkeit, gute Prüfungsvorbereitung, gute Qualifikationsmöglichkeiten:

Hinsichtlich der Studierbarkeit und der Prüfungsvorbereitung liegt das von

unseren Studierenden abgegebene Urteil leicht über den Durchschnitt. Besonders positiv bewerteten die Studierenden die Möglichkeiten zur überfachlichen Qualifizierung, die im Studienplan eingeräumten Wahlmöglichkeiten und die Berufsvorbereitung. Dies zeigt, dass die gebotene Kombination von wissenschaftlicher und auch praxisorientierter Lehre überzeugt. Zudem lässt sich der Schluss ziehen, dass die Anstrengungen zur Bündelung von überfachlichen Kursen des Studium Generale, von SAXEED, des Career Centers und der Graduierten- und Forschungsakademie unter der Dachmarke *proWissen* erfolgreich waren.

Defizite bei studienbezogenen E-Learning-Angeboten, aber überdurchschnittlich gute Betreuung in Tutorien, gute Didaktik bei den Lehrenden:

Das Mentoren- und Tutorenprogramm konnte sich seit 2008 etablieren und findet sehr erfreuliche Akzeptanz bei den Studierenden. Besonders würdigten die Ingenieurwissenschaftler die speziellen Betreuungsangebote in ihrer Studieneingangsphase. Negativ wurde von den Ingenieur- und den Wirtschaftswissenschaftlern laut Studie angemerkt, dass nur wenige Angebote zum studienbezogenen E-Learning existieren. Zeitgleich

mit der Studie wurde an unserer Universität eine E-Learning-Koordinationsstelle eingerichtet, sodass insbesondere die Entwicklung der diesbezüglichen Bewertungen für die nächsten Jahre abzuwarten und interessant bleibt. Als leicht überdurchschnittlich bewerteten die Studierenden die didaktischen Fertigkeiten der Lehrenden.

Studiernaufgabe- oder Wechselwünsche leicht niedriger als im Durchschnitt:

Alles in allem studieren 80 % der Wirtschaftswissenschaftler, 83,8 % der Naturwissenschaftler und 87 % der Ingenieurwissenschaftler nach eigener Aussage sehr gern an der TU Bergakademie. Mit den Studienbedingungen sind die Studierenden zufriedener als die anderer Universitäten; 69,1 % der Wirtschaftswissenschaftler, 76,1 % der Naturwissenschaftler und 80,7 % der Ingenieurwissenschaftler vergaben sogar das Prädikat „sehr zufrieden“. Schwierigkeiten hatten unsere jungen Leute mit der Verlängerung der Studiendauer durch Auslandsaufenthalte und dem Abfassen von Referaten und Hausarbeiten. Als erste Hilfestellung für die Lösung dieses Problems veranstaltete die Universitätsbibliothek im April 2013 erstmals die „Lange Nacht der aufgeschobe-

nen Hausarbeiten“. Unsere Studierenden wünschten sich auch mehr Beratung und Schulung zur IT- und Computernutzung sowie mehr Angebote zum Erlernen wissenschaftlicher Arbeitstechniken und Hilfsangebote bei psychischen und sozialen Problemen. Hierauf wurde bereits mit der Einrichtung einer psychosozialen Beratungsstelle reagiert.

Fazit

Insgesamt ist die TU Bergakademie Freiberg aus Sicht der Studierenden im Bereich Lehre gut aufgestellt – auch wenn es noch viele Baustellen gibt. Wir werden das Qualitätsmanagement Stück für Stück und Hand in Hand mit allen in der Lehre Aktiven voranbringen. Besonders am Herzen liegt uns für das Jahr 2014, Anregungen und Hilfestellungen zum wissenschaftlichen Arbeiten zu geben und publik zu machen.

Quellen

- Vgl. Wissenschaftsrat: Empfehlungen zur Qualitätsverbesserung von Lehre und Studium, S. 19 f., <http://www.wissenschaftsrat.de/download/archiv/8639-08.pdf>
- Vgl. Hochschulrektorenkonferenz (HRK): Für eine Reform der Lehre in den Hochschulen, 3. Mitgliederversammlung der HRK am 22.04. 2008, <http://www.hrk-bologna.de/bologna/de/download/dateien/rlehrebeschluss2008.pdf>

Vorteile des einstufigen Studiensystems: Bergakademie führt neue Diplomstudiengänge ein

Das Sächsische Hochschulgesetz macht es möglich: Zum Wintersemester 2013/14 führt die TU Bergakademie Freiberg die Diplomstudiengänge Maschinenbau und Verfahrenstechnik ein. Damit will die Ressourcenuniversität ihren Anspruch als Universität geltend machen, im Vorhinein einen höherqualifizierenden Abschluss anzubieten, und gleichzeitig den Studienbewerbern signalisieren, dass an der TU Freiberg auch langfristig ein 9–10-semestriges Studium am Stück ohne Einschränkungen möglich ist.

„Mit der Einführung der Diplomstudiengänge Maschinenbau und Verfahrenstechnik garantieren wir den neuen Studenten einen Rechtsanspruch auf diesen höherwertigen Studienabschluss auf Masterniveau“, so Dr. Andreas Handschuh, Kanzler der TU Bergakademie Freiberg. „Natürlich halten wir uns dabei an die Vorgaben der Bologna-Reform, sprich: Die Credit-Points unseres Diploms entsprechen zusammen denen eines Bachelor- und anschließenden Masterabschlusses.“ Die internationale Vergleichbarkeit bleibt damit gewahrt. „Die Universität reagiert damit auf die konstant hohe Nachfrage nach diesem Abschluss. Auch unsere Kontakte zur Industrie, wo der Diplomingenieur immer noch einen guten Ruf genießt, haben uns darin bestärkt, diesen Weg zu gehen“, so der Kanzler weiter. Die Diplomstudiengänge werden parallel zu den Bachelor-/Master-Studiengängen angeboten. Das Diplom mit seiner Regelstudienzeit von zehn Semestern kann von den Studenten flexibler gestaltet werden. Neben den zum Wintersemester beginnenden neuen Diplomstudiengängen Maschinenbau und Verfahrenstechnik werden an der TU Bergakademie Freiberg sechs weitere Studienrichtungen mit dem Abschluss Diplom angeboten: Angewandte Mathematik, Geotechnik und Bergbau, Keramik, Glas- und Baustofftechnik, Markscheidewesen und Angewandte Geodäsie, Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie sowie Betriebswirtschaftslehre für die Ressourcenwirtschaft.



Brücken zwischen Wirtschaft und Wissenschaft

Förderprogramme der Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg



Herausragende Talente fördern, akademische Bildung ermöglichen und jungen Menschen Perspektiven für ihre Zukunft zu eröffnen – das sind Grundanliegen der Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg. Seit Sommer 2011 beteiligt sie sich deshalb aktiv an der Finanzierung des Deutschlandstipendiums. Als einer der ersten Förderpartner sagte sie der Universität ihre Unterstützung zu und legte den Grundstein dafür, dass Freiberg deutschlandweit ein Vorreiter bei der Umsetzung des neuen nationalen Stipendienprogramms werden konnte.

Sparkassen-Stiftung – einer der ersten Partner beim Deutschlandstipendium

Im Sommersemester 2011 startete an der TU Bergakademie Freiberg das Deutschlandstipendium, bei dem Wirtschaft, Stiftungen oder Absolventen der Universitäten zusammen mit dem Bund Studenten fördern. Die ersten Förderer aus dem heimischen Umkreis hatten sich sehr bald dazu bereit erklärt, darunter die Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg. Diese Stiftung engagiert sich mit einem Vermögen von über einer halben Million Euro für die Studierenden der Freiburger TU. Stiftungszweck ist die Förderung von Forschung und Lehre an dieser traditionsreichen Ressourcenuniversität.

„Das aktuelle Stipendienprogramm, bei dem wir uns direkt in unserer Region für junge Leute einsetzen können, entspricht dem Grundanliegen unserer Stiftungstätigkeit“, so Sparkassenvorstand Hans-Ferdinand Schramm, stellvertretender Vorsitzender des Kuratoriums der Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg. „Wir unterstützen damit nicht nur die Studierenden, sondern ermöglichen es der TU auch, ihren leistungsstarken Studenten ein attraktives Förderprogramm anbieten zu können.“

Als sichtbares Zeichen der Förderung pflanzten die Deutschlandstipendiaten zusammen mit Freibergs Oberbürgermeister, dem Rektor der TU Bergakademie Freiberg und dem stellvertretenden Vorstandsvorsitzenden der Sparkasse Mittelsachsen einen Ginkgo-Baum im Innenhof des Schlosses Freudenstein.



FOTO: SPARKASSE

Abb. 1: Die ersten Deutschlandstipendiaten der TU Freiberg pflanzten gemeinsam mit dem Oberbürgermeister der Stadt Freiberg, Bernd-Erwin Schramm (2. v. li.), dem stellvertretenden Vorstandsvorsitzenden der Sparkasse Mittelsachsen, Hans-Ferdinand Schramm (2. v. re.), und dem Rektor, Professor Dr. Bernd Meyer (re.), einen Baum im Innenhof von Schloss Freudenstein in Freiberg.

„Der Baum im Schlosshof steht u. a. für die Kontinuität unserer Förderaktivitäten für junge Leute“, sagte Schramm (Abb. 1).

Gesellschaftliches Engagement mit historischen Wurzeln

Stifterin ist die heutige Sparkasse Mittelsachsen – eines der größten Unternehmen in Freiberg. Sparkassen haben eine lange Tradition in unserer Region. Gegenseitige Unterstützung innerhalb der Gemeinschaft und Hilfe zur Selbsthilfe in Notzeiten – das waren Anliegen, die die Verantwortlichen in Ämtern und Städten vor rund 200 Jahren dazu bewogen, Sparkassen einzurichten. Mit der Industrialisierung vergrößerte sich die Anzahl derer, die auf die sog. Armenkassen angewiesen waren. Eine soziale Abfederung, wie wir sie heute kennen, gab es in der Zeit der Sparkassen-Gründungen noch nicht.

Die Sparkassen in der Freiburger Region blicken auf eine über 150 Jahre alte Tradition zurück. Den Gedanken des Sparens geben sie seit vielen Generationen an die Menschen weiter. Die ältesten Sparkassen der Region sind die von Freiberg, Oberbobritzsch, Brand-Erbisdorf und Sayda. Die Freiburger Sparkasse ist eine der ältesten in Sachsen und der älteste Standort im heutigen Geschäftsgebiet der Sparkasse Mittelsachsen. Sie wurde im Juli 1823 gegründet – vor 190 Jahren. Freiherr von Friesen ergriff die Initiative

und gründete den „Verein der hiesigen errichteten Sparkasse zu Freiberg“. Am 28. Juli 1823 war der erste Öffnungstag. Im Jahr 1833 ging die Sparkasse dann in städtische Trägerschaft über. Der Gründung der Sparkasse in Freiberg folgten weitere, u. a. im Jahr 1848 in Oberbobritzsch, 1852 in Sayda und 1858 die „Sparcasse zu Brand“ im heutigen Brand-Erbisdorf.

Die Sparkasse in Niederbobritzsch gehört ebenfalls zu den ältesten Sparkassen-Instituten im Gebiet des früheren Landkreises Freiberg. Ihre Gründungsakten spiegeln eindrucksvoll die Sparkassen-Idee wider: „Der Zweck der Sparcasse ist, den Sinn für Sparsamkeit zu wecken und namentlich den minderbemittelten Bewohnern von Niederbobritzsch und Umgegend Gelegenheit zu geben, ihre kleinen Ersparnisse in nächster Nähe zinsbar anzulegen“ (Abb. 2).

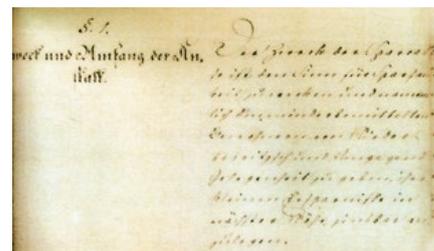


Abb. 2: Auszug aus dem Regulativ der Sparkasse Niederbobritzsch, S. 1, § 1: Zweck und Umfang der Anstalt. Das Regulativ wurde am 4. Januar 1868 vom Gemeinderat unterzeichnet und am 28. März 1868 vom Königlichen Gerichtsamt in Freiberg bestätigt.

Im Jahr 1998 feierte die Sparkasse den 175. Gründungstag des Freiburger Standorts. Zu diesem Anlass gründete sie eine Stiftung zur Förderung von Forschung und Lehre an der traditionsreichen Bergakademie. Mit den Erträgen aus dem Stiftungskapital will die Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg aktiv bei der Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses, der Etablierung innovativer Forschungsprojekte und der Förderung des öffentlichen Erscheinungsbilds der Technischen Universität mitwirken. Ihr erstes Stipendium erhielt in Anlehnung an den Initiator des am 16. April 1822 gegründeten „Vereins der hiesigen errichteten Sparkasse zu Freiberg“ den Namen „Freiherr-von-Friesen-Stipendium“. Seitdem folgten zahl-

Abb. 3: Zwölf Studentinnen und Studenten der TU Bergakademie Freiberg erhielten im Jahr 2009 ein Reisestipendium. Die Stipendien gingen an junge Leute, die einen Aufenthalt im Ausland antraten, sowie an Studierende, die aus dem Ausland an die TU Bergakademie gekommen waren.

reiche Stipendienprogramme und Förderprojekte mit einem bisherigen Gesamtvolumen von 150.000 Euro (Abb. 3).

Die Hochschule kann mit Unterstützung der Sparkassen-Stiftung Projekte zur Bildung der Jugend ins Leben rufen, die ohne diese finanzielle Hilfe nicht denkbar wären. Mit der Gründung dieser und weiterer Stiftungen dokumentiert die Sparkasse Mittelsachsen ihre regionale Verwurzelung. Sie unterstützt diejenigen, die verborgene Potenziale entdecken, kreative Ideen in die Tat umsetzen und damit die Zukunft gestalten.

■ Dr. Indra Frey und Klaus Borrmann, Vorstand der Sparkassen-Stiftung TU Bergakademie Freiberg



FOTO: SPARKASSE

„Entdecker“ der Nachhaltigkeit mit Festakt und Relief geehrt

Mit einem Festakt zu „300 Jahre Sylvicultura Oeconomica – 300 Jahre Nachhaltigkeit“ und der Enthüllung eines Bronzereliefs von Hans Carl von Carlowitz ehrte die TU Bergakademie Freiberg am 24. April den Mann, der mit seinem Buch „Sylvicultura oeconomica, Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmaeßige Anweisung Zur Wilden Baum-Zucht“ 1713 den Nachhaltigkeitsgedanken überzeugend formuliert hatte.

Unter den etwa 150 Gästen in der Alten Mensa waren etliche Nachhaltigkeitsexperten und auch der Nachfahre Wilhelm von Carlowitz. In ihren Festreden analysierten der Sächsische Oberberghauptmann, Prof. Bernhard Cramer, und der Journalist und Autor Ulrich Grober nicht nur die Geschichte des Nachhaltigkeitsbegriffs. Sie mahnten auch eindringlich, das Prinzip der Nachhaltigkeit im ursprünglichen Sinn hochzuhalten und es im Dreiklang wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Bedürfnisse zu sehen. In diesem Sinn appellierte auch Wilhelm von Carlowitz in seinem Grußwort an unsere Gesellschaft, die Gedanken seines Vorfahren umfassend zu berücksichtigen und den Urenkeln weder Schulden noch Atomabfall zu hinterlassen.

Cramer, als Sächsischer Oberberghauptmann ein Amtsnachfolger Carlowitzens, hob die Bedeutung des Erbes für den modernen Bergbau hervor. Die heutigen Aufgaben des Oberbergamts unterscheiden sich erheblich von denen dieses Ressorts in der „Carlowitz-Zeit“: Nicht allein der ökonomische Ertrag steht im Vordergrund, sondern Bergbauunternehmungen sind an Nachhaltigkeitsaspekten zu messen und die Gefahren des Altbergbaus dauerhaft abzuwehren. Bergbau ist dem Nachhaltigkeitsprinzip verpflichtet und zugleich eine Herausforderung, charakterisierte Cramer das Spannungsfeld: „Bergbau muss so gestaltet sein, dass er als primärer Wirtschaftszweig Garant für eine nachhaltige Entwicklung ist. Das heißt, er muss wirtschaftlich erfolgreich sein, sicher geführt werden und sich um Rekultivierung und Wiedernutzbarmachung sorgen.“ Der Ursprung des Nachhaltigkeitsgedankens von Carlowitz stand im Mittelpunkt der Festrede von Ulrich Grober. Grober, der als Wiederentdecker der Leistung von Carlowitz gilt, sezierte gekonnt die Sprach- und Denkmuster der damaligen Zeit. Grober sieht Sachsen als ein Land, in dem schon lange über den Umgang mit Ressourcen „tiefschürfend“ nachgedacht wird. Im Anschluss an den Festakt wurde am ehemaligen Wohnhaus von Hans Carl von Carlowitz auf dem Freiburger Obermarkt ein Bronzerelief enthüllt. Es zeigt Carlowitz gemäß der einzigen bildlichen Überlieferung mit dem berühmten Zitat aus der Sylvicultura Oeconomica, in der das Wort „nachhaltend“ auftaucht: „*daß es eine kontinuierliche beständige und nachhaltige Nutzung gebe / weiln es eine unentberliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag.*“

Stipendium für junge Wissenschaftlerinnen

Am 14. Juni wurde bei der feierlichen Verabschiedung der Promovierten der TU Bergakademie Freiberg im Städtischen Festsaal erstmals das Mary-Hegeler-Stipendium vergeben. Das neue Stipendium, das an die erste eingetragene Studentin an der Bergakademie Freiberg erinnert, soll junge Wissenschaftlerinnen für maximal 12 Monate bei der Beantragung eines Habilitationsprojekts oder beim Abschluss einer Habilitation unterstützen.

Als erste Stipendiaten ausgewählt wurden dafür Dr. Alina Ruziyeva, die eine Habilitation auf dem Gebiet der Angewandten Mathematik anstrebt, sowie Dr. Anke Schwarz, die eine Forschungsgruppe in der Materialchemie zu organischen Materialien aufbauen möchte. Prof. Michael Stelter, Prorektor für Forschung, überreichte die Stipendienurkunden. Mary Hegeler aus La Salle im Bundesstaat Illinois/USA war die erste eingeschriebene Studentin an der Bergakademie Freiberg. Von 1885 bis 1886 besuchte sie Vorlesungen und Praktika, die sie alle mit der Note Eins abschloss. Zurück in Amerika, übernahm sie den Posten des leitenden Redakteurs des Verlags Open Court. Rechtliche Grundlagen erhielt das Frauenstudium erst 1913 in der Satzung der Bergakademie, die besagte, dass Frauen als Hörerinnen unter Einschränkungen zugelassen werden können.

Freiberger Forschungsforum

64. Berg- und Hüttenmännischer Tag

Der Berg- und Hüttenmännische Tag als wissenschaftliche Hauptveranstaltung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg erlebte im Jahr 2013 seine 64. Auflage. Er umfasste das „Forum für Nachhaltigkeit – Energie und Ressourcen“ sowie die traditionellen Fachkolloquien einzelner Fakultäten bzw. Institute unserer Universität.

Im Rahmen des Tagungsteils „Forum für Nachhaltigkeit – Energie und Ressourcen“ referierten

- Sven Morlock (Sächsischer Staatsminister für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr)
- Barbara Kux (Mitglied des Vorstands der Siemens-AG)
- Prof. Bernd Meyer (Rektor der TU Bergakademie Freiberg)
- Prof. Wolfgang Voigt (Fakultät 2, Chemie u. Physik)
- Prof. Matthias Reich (Fakultät 3, Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau)
- Prof. Horst Biermann (Fakultät 5, Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie)
- Prof. Michael Höck (Fakultät 6, Wirtschaftswissenschaften)

Die *Fachkolloquien* widmeten sich folgenden Leitthemen:

- FK 1: Freiberger Siliciumtage
- FK 1.1: Freiberger Silicon Days – Freiberger Sawing Symposium
- FK 2: Ressourcen und Geotechnik
- FK 3: ADDE – Atomares Design
- FK 4: Energiewende ohne Ende? Zur Notwendigkeit der Akzeptanzforschung für Energie- und Ressourcentechnologien
- FK 6: Tagebautechnisches Kolloquium
- FK 7: Tiefer, präziser, effektiver – neueste Trends und Entwicklungen der Tiefbohrtechnik
- FK 8: Freiberg-St.-Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler: Prozesskette von der Lagerstätte zum Produkt, inklusive Wirtschaft, Umwelt und Lehre

Berichte zu den einzelnen Kolloquien finden sich unter:

<http://tu-freiberg.de/researchforum>

„Energiewende erfordert intelligente Systemlösungen aller Energien“

Die Energiewende aus Sicht der Politik stand im Mittelpunkt des Abendempfangs zum 64. Berg- und Hüttenmännischen Tag an der TU Bergakademie Freiberg im Städtischen Festsaal.

Bundesumweltminister Peter Altmaier und Sachsens Ministerpräsident Stanislaw Tillich trugen vor gut 200 Gästen ihre Positionen zu den Themen Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Umbau der deutschen Energieversorgung vor. Im Anschluss diskutierten beide Politiker auf dem Podium mit Rektor Prof. Bernd Meyer und weiteren Wissenschaftlern der Ressourcenuniversität. Altmaier stellte gleich zu Beginn seines Vortrags fest, dass man mehr als 200 Jahre gebraucht habe, um zu erkennen, dass Carlowitz' Prinzip der Nachhaltigkeit weit über die Forstwirtschaft hinaus Bedeutung habe. Die Herausforderung der Gegenwart laute, Umweltschutz und Wohlstand gleichzeitig zu ermöglichen. Dafür ist die Ressourceneffizienz unglaublich wichtig, auch wenn sie in der Öffentlichkeit bisher kaum Beachtung findet. Die Energiewende ist nach Altmaiers Worten das größte gesellschaftliche

Projekt in Deutschland seit dem Wiederaufbau nach dem Zweiten Weltkrieg und der Wiedervereinigung 1989/90. Erfolgreich kann dieses Projekt nur sein, wenn erneuerbare Energien und moderne Rohstofftechnologien zusammen bestehen. Dafür benötigt man aber intelligente Systemlösungen und die Weiterentwicklung von Technologien wie beispielsweise Power-to-gas. Einfach nur die Atomkraftwerke abzuschalten und dazu noch die Kohle aus dem Energieportfolio zu verbannen, ist kein Ausweis für eine erfolgreiche Energiewende.

Auch Ministerpräsident Stanislaw Tillich warnte davor, die Kohle als Energieträger aufzugeben, denn mit einem Raus aus der Kohle verlöre die deutsche Wirtschaft eine weltweit nachgefragte Kompetenz. Rektor Prof. Bernd Meyer zeigte sich davon überzeugt, dass die Energiewende der Startschuss für eine Rohstoffwende ist. Dabei sollte der langfristig zu erwartende Stromüberschuss aus den Erneuerbaren Energien dazu genutzt werden, ihn in die stoffliche Nutzung einzukoppeln und damit erstmals auch Stoffkreisläufe zu schließen.

Elektroauto zu Forschungszwecken

Ein Elektroauto soll Rückschlüsse für die Energiewende liefern: Im Beisein von Bundesumweltminister Peter Altmaier und Sachsens Ministerpräsident Stanislaw Tillich erhielt die TU Bergakademie Freiberg am 12. Juni 2013 von der enviaM Mitteldeutsche Energie AG leihweise ein Elektrofahrzeug zu Forschungszwecken.

Damit startete ein gemeinsames Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Elektromobilität zwischen den Partnern, die im Oktober vergangenen Jahres eine Kooperationsvereinbarung geschlossen hatten. Im Forschungsvorhaben zum Elektroauto werden das Institut für Elektrotechnik, der enviaM Netzdienstleister MITNETZ STROM GmbH und die Stadtwerke Freiberg zusammenarbeiten.

Schwerpunkte sind einerseits eine Praxisstudie zum Nutzerverhalten von Elektroautos, andererseits wollen Wissenschaftler und Ingenieure nach Möglichkeiten forschen, ob und wie das Elektromobil als zusätzliches Speichermedium für überschüssigen Strom aus Sonnenenergie genutzt werden könnte. Im ersten konkreten Forschungsvorhaben soll die Elektromobilität im Zusammenhang mit dem Einsatz erneuerbarer Energien für Wohnzwecke untersucht werden: „Ziel ist eine Langzeitnutzestudie für den Li-Ionen-Akkumulator des Elektroautos“, so Prof. Jana Kertzsch, Direktorin des Instituts für Elektrotechnik. „In regelmäßigen Abständen wird der Akkumulator auf unserem Prüfstand vermessen, um so Veränderungen seiner Eigenschaften während der Lebensdauer zu erkennen.“



Bundesumweltminister Peter Altmaier (von links), Honorarprofessor Timo Leukefeld, enviaM Vorstand Ralf Hiltenkamp, Sachsens Ministerpräsident Stanislaw Tillich, Elektrotechnik-Professorin Jana Kertzsch und Rektor Prof. Bernd Meyer bei der Übergabe des Elektroautos an die Universität

Farbige Fluoritkristalle aus dem Schwarzwald für die Mineralogischen Sammlungen der TU Bergakademie

Andreas Massanek¹, Ulf Kempe², Gerhard Heide³

Am 5. Oktober 2012 wurde die neue Ausstellung „Mineralogische Sammlung Deutschland“ im Krügerhaus feierlich eröffnet und die mineralogische Weltreise, die die Besucher der terra mineralia im Schloss Freudenstein seit 2008 antreten können, um Minerale von deutschen Fundstellen komplettiert.

Für die Ausstellung im Krügerhaus wurde Sammlern und Museen die Möglichkeit gegeben, sich durch Zustiftungen oder Leihgaben aktiv an der Gestaltung zu beteiligen. Mehr als 100 Personen und Museen haben bisher diese Gelegenheit genutzt. Die dafür gegründete Stiftung soll die Keimzelle einer deutschen Nationalsammlung sein und sich stetig weiterentwickeln. Die Grundlagen dafür wurden durch das private Engagement des Stifterehepaars Erika und Peter Krüger für das Gebäude und durch die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung für die Ausstellung gelegt.

Schon kurz nach der Fertigstellung der Ausstellung meldeten sich erneut Sammler, die von der eindrucksvollen Schau erfahren hatten, um Teile ihrer Sammlungen zur Verfügung zu stellen. Eine dieser Persönlichkeiten soll hier näher vorgestellt werden.

Herr Günter Ertle aus Schopfhausen im Schwarzwald schrieb einen bewegenden Brief an den Verein der Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V.: „... in Würdigung der Verdienste um die Mineralogie schenke ich zehn Stufen zur freien Auswahl aus meiner Mineraliensammlung“. Seit der Eröffnung der terra mineralia war Herr Ertle schon viermal in Freiberg und von den Ausstellungen im Schloss Freudenstein und im Werner-Bau total begeistert. Sein Elternhaus lag unweit eines Steinbruchs; er begann schon sehr frühzeitig, Minerale zu sammeln und sich für die Mineralogie zu interessieren. Bis zu seiner Pensionierung war er in der Textilindustrie tätig. Herr Ertle übergab der Stiftung sehr interessante Fluoritstufen. Sie



FOTO: H. KOHLSTOCK

Günter Ertle übergibt attraktive Fluoritstufen an die TU Bergakademie Freiberg (v.l. Prof. Gerhard Heide, Günter Ertle, Dipl.-Min. Andreas Massanek)

stammen beispielsweise von Fundorten aus dem Schwarzwald wie Riedlingen, Maienberg oder Grunbach, die bisher in den Geowissenschaftlichen Sammlungen nicht vertreten waren, wodurch nun markante Lücken geschlossen werden konnten. Auch Stufen mit intensiv gelb gefärbten Kristallen, die dadurch schon einen fast bräunlichen Farbeindruck hinterlassen, durften aus der umfangreichen Sammlung ausgewählt werden. Sie stammen aus dem Schweizer Jura und dem White Rock Quarry in Ohio/USA. Zur Auswahl gehören auch Stufen mit Kristallformen, denen man nicht so häufig begegnet. Ein kleiner farbloser Rhombendodekaeder aus Colorado, der von rosaroten Rhodochrositkristallen begleitet wird, beeindruckte die Wissenschaftler genauso wie ein stark parkettiertes, violettes Kristallaggregat aus La Collada in Spanien.

Mehr als 40 Sammler oder Institutionen konnten bis jetzt als Stifter gewonnen werden. Mit der hier beschriebenen Zustiftung und weiteren Bekundungen zeigt sich, dass die Idee, Sammler und/oder Wissenschaftler als Stifter für unsere Ausstellung zu gewinnen, tragfähig ist. Die Zusammenarbeit mit Personen, die sich intensiv mit bestimmten Mineralfundpunkten oder Mineralarten beschäftigen, ist für die Freiburger Mineralogen eine wichtige Quelle für neue

Informationen und neues Forschungsmaterial. Sammler helfen als Bürgerwissenschaftler nicht nur, die Attraktivität der Ausstellungen, sondern auch deren wissenschaftlichen Wert zu erhöhen.

Wer die neuen mineralogischen Dauerausstellungen im Schloss Freudenstein und im Krügerhaus oder auch die fast 250jährige Sammlung im Werner-Bau besucht hat, dem sind sicher zahlreiche, wunderbar auskristallisierte Stufen des Minerals Fluorit aufgefallen: verschiedenste Nuancen der Farbe Grün aus dem Xianghualing-Massiv in Hunan in China, zart violette Kristalle aus Strzegom in Polen oder La Collada in Spanien, rosa Oktaeder aus alpinen Bereichen in Frankreich und der Schweiz, gelbe und blaue Würfel aus dem Freiburger Revier, dunkelviolette bis schwarze Bildungen aus Wölsendorf in der Oberpfalz und auch farblose, wasserklare Kristalle aus Dalnegorsk im Fernen Osten Russlands.

Woher kommt diese Farbenvielfalt? Fluorit gehört zur Gruppe der Halogenide. Es ist Calciumfluorid mit der chemischen Formel CaF_2 . Anstelle von Calcium- können andere Metallionen eingebaut werden, sofern sie einen ähnlichen Ionenradius und die gleiche oder eine ähnlich hohe Ladung besitzen, besonders häufig Ionen der sog. Seltenerdlemente (Lanthanide und Yttrium). Da diese Elemente meist dreifach geladen sind und nicht wie Calcium zweifach, müssen zusätzliches Fluorid, der Ersatz von Calcium durch einfach geladene Natriumionen, ein Ersatz von Fluorid gegen Sauerstoffion oder Calciumleerstellen für den notwendigen Ladungsausgleich sorgen. Durch radioaktive Strahlung



Fluorit, Calcit, Stbr. Riedlingen b. Kandern, Schwarzwald, Baden-Württemberg (Ausschnitt), Bildbreite 12 cm

1 Dipl.-Min. Andreas Massanek,
Andreas.Massanek@geosamm.tu-freiberg.de
2 Dr. Ulf Kempe,
Ulf.Kempe@mineral.tu-freiberg.de
3 Prof. Dr. Gerhard Heide,
Gerhard.Heide@mineral.tu-freiberg.de

können ebenfalls Farbeffekte hervorrufen worden sein.

Reiner, nur Calcium- und Fluorid-Ionen enthaltender und/oder unbestrahlter Fluorit ist absolut farblos. Wenn nur wenige Risse oder Einschlüsse von Gasen und Flüssigkeiten vorhanden sind, ist das Mineral wasserklar, d. h. vollständig durchsichtig.

Eine braune Färbung kommt nur sehr selten vor. Sie ist immer ein Hinweis auf eine relativ unspezifische Farbursache; es können verschiedenartige Störungen in der Struktur und durch Fremdionen bedingte Defekte beteiligt sein. Die Untersuchung an braunen Fluoriten zeigt, dass die Färbungsursache in langandauernder radioaktiver Bestrahlung liegt, die – im Unterschied zu den anderen Färbungsvorgängen – durch den Einbau der Strahlungsquelle (Thorium) in das Mineral hervorgerufen wird.

Die violette Farbe wird durch den β -Anteil (Elektronen) der radioaktiven Strahlung bewirkt, wenn einige Fluoridionen im Mineralgitter fehlen. Die Farbe ist also nicht direkt an das Vorhandensein von bestimmten Fremdelementen im Fluorit gebunden. Bei Anwesenheit von Natriumionen scheint die Entstehung von violetter Farbe jedoch befördert, bei hohen Seltenerdelementgehalten dagegen behindert zu werden. Violett ist eine der häufigsten Färbungen des Fluorits.

Die blaue Farbe ist sehr instabil. Häufig verblasen die entsprechenden Fluorite, wenn sie längere Zeit dem Tageslicht ausgesetzt sind. Ein Beispiel für diesen Effekt sind die ehemals wunderbar tiefblauen Kristalle aus der Grube Beihilfe in Halsbrücke, die später nur noch unscheinbar grau in den Vitrinen erscheinen. Die Ursache der blauen Farbe ist nicht völlig geklärt, hängt aber mit dem Einbau von Yttriumionen zusammen.

Ein grüner Farbeindruck wird durch Samarium der Oxidationszahl +2 hervor-

gerufen. Diese ungewöhnliche Valenz ist eine Folge der radioaktiven Bestrahlung und wird durch Ce^{4+} -Ionen oder andere Akzessorien stabilisiert. Im ersteren Fall kann die Farbe durch leichte Erwärmung oder lange Sonneneinstrahlung verblasen. Dieser Färbungsvorgang wurde schon 1959 von Feofilov an synthetischen Fluoriten reproduziert.

Gelber Fluorit ist ungewöhnlich, im Erzgebirge und auch im Mississippi-Tal jedoch recht häufig anzutreffen. Seine Farbe könnte mit einem Gehalt an Sauerstoff oder Schwefel zusammenhängen. Ihre genaue Ursache ist aber noch unklar. Gelbe Fluorite treten besonders bei Blei-Zink-Vererzungen in Fluorit-Baryt-Gängen auf.

Die rosa Farbvarietät ist typisch für offene, mineralführende Spalten, die sogenannten alpinotypen Klüfte. Man hat herausgefunden, dass geringe Mengen von Yttrium und Sauerstoff die Färbung bewirken. Ein solches Phänomen konnte an künstlichen Fluoriten reproduziert werden.

Die Strichfarbe des Fluorits (Farbe des Pulvers) ist – außer bei dunklen Kristallfarben – immer weiß.

Seine Farbenvielfalt hat dem Fluorit auch den Beinamen „Harlekin unter den Mineralen“ oder auch „Mineral des Regenbogens“ eingebracht. In einer Vitrine im Werner-Bau, die Fluorite von verschiedenen Fundstellen zeigt, können sich die Besucher auf eindrucksvolle Weise von diesem breiten Farbenspektrum überzeugen.

Fluorit ist eines der häufig vorkommenden Minerale. Das wird auch in der Ausstellung terra mineralia im Schloss Freudenstein und im Krügerhaus deutlich, denn dort sind von allen Kontinenten und aus fast allen beteiligten Ländern Fluoritstufen vertreten. Gut ausgebildete Kristalle kommen in vielen Lagerstätten bzw. Fundpunkten vor, sodass dieses Mineral bei Sammlern bestens bekannt

und begehrt und in jedem Geo-Museum zu finden ist. Fluorit kristallisiert im kubischen Kristallsystem. Der Würfel ist die häufigste Form. Oft finden sich aber auch Kombinationen mit dem Oktaeder oder Rhombendodekaeder, seltener mit einem Pyramidenwürfel oder Hexakisoktaeder (48-Flächner). Hin und wieder kommen Pyramidenwürfel oder – bei hohen Temperaturen – reine Oktaeder vor. Die Würfelflächen sind häufig glänzend und glatt und können eine ausgeprägte Parkettierung zeigen. Oktaederflächen sind dagegen meist rau und matt ausgebildet.

Im deutschen Sprachgebrauch wird das Mineral auch „Flussspat“ genannt. Dieses Wort leitet sich zum einen von „Fluss“ ab, gemäß seinem wichtigen Verwendungszweck als Flussmittel in der Metallurgie und der keramischen Industrie – zum anderen von „Spat“ angesichts einer charakteristischen Eigenschaft: seiner sehr vollkommenen Spaltbarkeit. Obwohl das Mineral schon seit der griechischen Antike bekannt ist, wurde es zuerst von Agricola in seinem Bermannus (1529) beschrieben: „*lapides sunt gemmarum similes, sed minus duri, fluores*“. Der Begriff *fluores* wurde mit „Flüsse“ übersetzt. Wallerius (1747) führte *Spatum vitreum* (Glasspath) ein und Cronstedt (1758) vereinigte diese Bezeichnungen und verwendete die Synonyme „Fluss, Flussspat und Glasspat“. Den Ausdruck Fluorite benutzte zuerst Napione (1797). Weitere Namensgebungen des 19. Jahrhunderts setzten sich nicht durch. Mohs (1824) entdeckte, dass Fluorit die Eigenschaft der Fluoreszenz aufweist. Der Begriff Fluoreszenz wurde



Fluorit, Rauchquarz, Grube Bikov, Sibirien, Russland, 27 × 14 × 8 cm



Fluorit, Rhodochrosit, Chalkopyrit, Sphalerit Rodney's Pocket, Colorado, USA, 6 × 6 × 4 cm



Fluorit, Coelestin, White Rock Quarry, Clay Center, Ottawa Co., Ohio, USA, 7 × 9 × 7 cm

FOTOS ©: S. PASKOFF

aber erst von Stokes (1854) aus dem Namen Fluorit abgeleitet.

Fluorit ist sehr spröde. Wird das Mineral zerschlagen, zeigt sich seine vollkommene Spaltbarkeit parallel zu den Oktaederflächen. Seine Dichte liegt bei $3,18 \text{ g/cm}^3$. Fluorit ist Referenzmineral mit der Härte 4 in der Mohs'schen Härteskala.

Fluorit bildet sich vorwiegend im Gefolge magmatischer Aktivitäten, die im Kontext mit globalen, geotektonischen Abläufen gesehen werden müssen. In auskristallisierten spätmagmatischen Hohlräumen (beispielsweise Pegmatiten) und vor allem in Gängen der heißen, fluiden Nachphasen (Hydrothermen) unterschiedlichster Bildungsräume kann Fluorit vorkommen: in Klüften und Gängen im Nebengestein, in metasomatischen Verdrängungskörpern und instockwerkartigen Bildungen. Auch im sedimentären Umfeld ist Fluorit zu finden. Solche Vorkommen sind jedoch wirtschaftlich bedeutungslos.

Weltweit wurden im Jahr 2012 mehr als 5,9 Millionen Tonnen Fluorit abgebaut. Davon entfallen mehr als die Hälfte (51,7%) auf China, 16,8% auf Mexiko, 7% auf die Mongolei, 5,1% auf Südafrika und 3,3% auf Russland. Deutschland produzierte 2005 etwa 33.000 Tonnen bei einem Bedarf von mehr als 250.000 Tonnen. In den Jahren 2000 bis 2005 verdoppelte sich der Preis auf fast 250 US-\$ pro Tonne Fluorit. 2010 wurden die Weltvorräte mit 240 Millionen Tonnen angegeben. Darunter befinden sich 2,8 Millionen Tonnen aus Sachsen. Im Durchschnitt verbraucht ein Mensch in seinem Leben (80 Jahre) etwa 400 Kilogramm Fluorit [www.bgr.bund.de].

Fluorit ist eines der wichtigsten Industriemineralien. Mit zunehmender Reinheit unterscheidet man zwischen Hütten-, Keramik-, Säure- und optischem Spat. Hüttenspat dient bei der Stahl- und Leichtmetallerzeugung als Flussmittel,

mit dem man eine bessere Fließfähigkeit der Schlacken erreicht. Je nach Verfahren werden zur Erzeugung von einer Tonne Rohstahl bis zu 7 kg Fluorit benötigt. In der keramischen Industrie wird Fluorit zur Herstellung von Gläsern und von Email verwendet. Säurespat ist das wichtigste Ausgangsmaterial für die Produktion von Fluorwasserstoff und dessen wässriger Lösung Fluorwasser. Diese beiden Stoffe sind Grundmaterialien für die Herstellung mannigfaltiger organischer und anorganischer Fluorverbindungen in der chemischen Industrie.

Da Linsen aus Fluorit die Eigenschaft haben, die Strahlung des gesamten Lichtspektrums, insbesondere im ultravioletten Bereich, gleichmäßig zu brechen, wurden hochreine, wasserklare Fluoritkristalle als optischer Spat zur Fertigung von Linsen, Prismen und Filtern eingesetzt, die die sphärische und die chromatische Aberration in den Objektiven der Mikroskope korrigieren. Weil natürliche Fluoritkristalle in dieser Qualität, Menge und Größe nur begrenzt vorkommen, werden heute zu diesem Zweck nur noch synthetische Fluoritkristalle verwendet. Ein solcher Kristall von 63 kg Gewicht wurde von der Firma Schott Lithotec zum 59. Berg- und Hüttenmännischen Tag anlässlich der bevorstehenden Eröffnung der Ausstellung terra mineralia an den Direktor der Geowissenschaftlichen Sammlungen, Prof. Dr. Gerhard Heide, übergeben. Es ist eines der faszinierendsten Exponate in der Aussichtsplattform der Ausstellung im Freiburger Schloss Freudenstein. Der kreisrunde, zylindrische Körper findet seine Verwendung in der Mikrolithographie. Die Züchtung der Fluoritkristalle wurde mittlerweile von der Firma Hellma Optik Jena übernommen.

Literatur:

- Baranov, A.: Thermisches Zersetzungsverhalten ausgewählter natürlicher und künstlicher Fluorite, Bachelorarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2010.
- Kempe, U., Plötze, M., Brachmann, A., Böttcher, R.: Stabilisation of divalent rare earth elements in natural fluorite. In: Mineralogy and Petrology, 76(2002)213-234.
- Monecke, T., Monecke, J., Mönch, W., Kempe, U.: Mathematical analysis of rare earth element patterns of fluorites from the Ehrenfriedersdorf tin deposit, Germany: Evidence for a hydrothermal mixing process of lanthanides from two different sources. In: Mineralogy and Petrology, 70(2000) 235-256.
- Trinkler, M., Kempe, U., Plötze, M., Rieser, U.: About rose and brown fluorite from Sn-W deposits. In: Chemie der Erde - Geochemistry, 53(1993)165-181.

Freiberger Gießer stellen Völkerschlacht-Medaillen aus alten Kanonenkugeln her



Im Jahr 2013 jährt sich die Völkerschlacht bei Leipzig, eine der größten Schlachten der Weltgeschichte, zum 200. Mal. Gleichzeitig wird das Völkerschlachtdenkmal 100 Jahre alt. Die Sächsische Numismatische Gesellschaft (SNG) bat deswegen die Gießer der TU Bergakademie Freiberg darum, ein besonderes Erinnerungsstück herzustellen: eine Medaille aus in der Völkerschlacht verschossener Munition.

Der Kampfmittelbeseitigungsdienst der sächsischen Polizei lieferte dafür insgesamt 200 Kilogramm Kanonenkugeln und Granatsplitter, die auf Schlachtfeldern rund um Leipzig gefunden wurden. Die Gießer der TU Bergakademie bestätigten nach einer Materialanalyse, dass es möglich sei, aus der verrosteten Munition eiserne Medaillen zu fabrizieren. „Fast wie bei der Redewendung Schwerter zu Pflugscharen verwandeln wir in diesem Fall Munition zu Medaillen“, beschreibt Dr. Uwe Nitsch vom Gießerei-Institut das Projekt. Die Freiburger Techniker schmolzen dafür die alten Kanonenkugeln ein, um das gewonnene Eisen in eine Form zu gießen. Den Entwurf für die Medaille im Format $13 \times 8 \text{ cm}$ lieferte der bekannte Dresdner Künstler Peter-Götz Güttler. Das Völkerschlachtdenkmal steht in der Mitte. Das untere Drittel zeigt die Umriss des geeinten Europas, über das eine Friedenstaube fliegt. Auf der Rückseite prangen die fünfzeilige Inschrift „Aus dem Eisen von den Schlachtfeldern um Leipzig“, das Signet der Herausgeber, der stehende sächsische Löwe mit den Initialen SNG sowie das Gießereizeichen der Bergakademie. Die Gesamtauflage der Medaille beträgt 600 Stück.



Fluorit, Quarz, La Collada, Siero, Asturias, Spanien, (Ausschnitt), Objektbreite 10 cm

Leben in den Grenzen unseres Planeten ...

Zum Thema „Leben in den Grenzen unseres Planeten“ versammelte das Zentrum Wald Forst Holz Weihenstephan, gebildet aus der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement der TU München, der Fakultät Wald und Forstwirtschaft der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, am 22. März 2013 am Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1 in Freising/Weihenstephan unter der Leitung von Olaf Schmidt sechs Vortragende und etwa 150 Gäste.

Wie viel Nachhaltigkeit können wir uns leisten?, war der in diesem Zusammenhang provokante Titel des Vortrags von Prof. Dr. rer. pol. Dr. h.c. mult. Klaus Töpfer, ehemaliger Bundesumweltminister und Direktor des UNEP, Nairobi, heute dem Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) Potsdam zugehörig. Fraglich bleibt bei einer weltweit orientierten Betrachtung des als universell geltend verstandenen Prinzips, welche politischen, sozialen und ökonomischen Ziele in Bezug auf ein zu definierendes Niveau des Schutzes von Natur und Umwelt angestrebt werden sollten.¹ Töpfer verdeutlichte so, dass „Nachhaltigkeit“ ein politischer Begriff ist, dessen konkreter Inhalt zeitbezogen stets der Aus handlung bedarf.

Die Entwicklung und Umsetzung von Nachhaltigkeitsgedanken im Forst war das Thema von Dr. Joachim Hamberger von der Staatlichen Führungsakademie für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Hamberger begründete die Notwendigkeit eines Ausgleichs der von verschiedenen Seiten an die Forstverwaltungen herangetragenen Anforderungen.² Zugleich trat er durch eine geistvoll kommentierte Edition der „Sylvicultura oeconomica“ hervor. Von besonderem Interesse waren seine Ausführungen zu der Frage, ob denn der Freiburger Oberberghauptmann von Carlowitz³ (1645–1714) als „Erfinder der Nachhaltigkeit“ anzusehen ist. Nicht nur Hamberger hat an dieser Sichtweise seine fachlich begründeten Zweifel.⁴ Seine Schlussfolgerung: „Carlowitz will das Wort nicht besonders hervorheben. (...) Ihm rutscht der Begriff gleichsam nur so heraus. Hätte er ihn einführen wollen, hätte er ihn sicher häufiger verwendet und in seinem Sinn entwickelt. Dagegen



Anlässlich der Enthüllung des Denkmals für Hannß Carl von Carlowitz, links im Bild der Bayerische Staatsminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Helmut Brunner

schreibt er an Stellen im Buch, an denen »nachhaltend« sehr gut passen würde, von »continuirlicher Holznutzung«, von »pflöglicher Holz-Cultur«, vom »holzgerechten Manne«, von »perpetuierlicher« Versorgung.«⁵

Nur weil sich nach der Welt-Umweltkonferenz von Rio de Janeiro 1992 Zweifel mehrten, ob mit der so genannten „Brundtland-Formel“ von 1987 nicht einfach nur der bisher verfolgte Wachstumskurs der Volkswirtschaften fortgeschrieben würde, fand sich in der deutschen Übersetzung der aus der Forstwirt- und Forstwissenschaft entnommene Ausdruck des „nachhaltigen Wachstums“, um gegenüber dem dauerhaften Wachstum einen Unterschied zu betonen.⁶ Die ursprüngliche deutsche Fassung der Brundtland-Formel lautet: „Dauerhafte Entwicklung ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“⁷

Diese Gedanken finden sich bereits im antiken Schrifttum wieder, so in einer philosophischen Erörterung des freigelassenen Sklaven Epiktet (etwa 50 bis 120 u.Z.). Der Christ Epiktet preist das Leben als die Zeugenschaft des Wirkens Gottes mit dem Bild eines Festmahls unter den Vorzeichen begrenzter Möglichkeiten, die er mit dem menschlichen Wir-

ken in Beziehung setzt: „Warum sollte ich mit Gott hadern? Warum sollte ich haben wollen, was nicht in der Reichweite meines Willens liegt, und behalten wollen, was mir nicht auf immer gegeben wurde? Wie aber soll ich damit umgehen? Wie es mir gegeben ist und solange es möglich ist. (...) Und wozu bist du auf die Welt gekommen? (...) Etwa nicht als ein sterbliches Geschöpf? Nicht als ein Wesen, das mit seinem bisschen Leib auf der Erde leben, sein Walten schauen, ein Weilchen bei seinem Festzug zusehen und mitfeiern soll? (...) Aber das Fest ist zu Ende. Geh fort, entferne Dich voll Dankbarkeit und Ehrfurcht. Mach anderen Platz. Es müssen auch noch andere ins Leben treten, wie auch du geboren wurdest, und wenn sie geboren sind, müssen sie Raum, Wohnung und Nahrung haben. Wenn sich aber die Frühergeborenen nicht leise entfernen, was bleibt dann den Späteren? Warum bist du so unersättlich? Warum so unbescheiden? Warum machst du die Welt so eng?“⁸

Bescheidenheit und kritische Selbstreflexion des eigenen Handelns sind aus Sicht des Autors dem Kern des inhaltlichen Anliegens von „Nachhaltigkeit“ näher, als die Welt wieder einmal bevormundend am deutsch-sächsischen Wesen genesen zu lassen. In diesem Sinne empfiehlt es sich, Hannß Carl von Carlowitz künftig nicht mehr die „Erfindung“ der Nachhaltigkeit zuzuschreiben.

Anmerkungen

- 1 Dass es daran mit Bezug auf den Umweltschutz hapert, zeigt die derzeit gescheiterte Initiative, mit Geldzahlungen der internationalen Gemeinschaft an Ecuador die Erdölförderung im Regenwaldgebiet zu verhindern. <http://www.tagesspiegel.de/politik/umweltschutz-erdoel-statt-regenwald/8652418.html> (18.09.2013)
- 2 Vgl. dazu Weihenstephaner Erklärung, <http://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/wald/forstpolitik/dateien/weihenstephaner-erklaerung.pdf> (18.09.2013)
- 3 „Er skizziert die gesamte Struktur des modernen Nachhaltigkeitsdenkens.“ Grober, Ulrich: Die Entdeckung der Nachhaltigkeit. Kulturgeschichte eines Begriffs. München 2011, S. 116. Zurückhaltender beurteilte Grober den Zusammenhang später; er sehe, so die mündliche Mitteilung an Hamberger, „den Begriff bei Carlowitz gleichsam im embryonalen Zustand“. Hamberger, Joachim (Hrsg.): Hans Carl von Carlowitz. Sylvicultura oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige

Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. München 2013, S. 26, Fußnote 43, Grober an Hamberger, 4. Juli 2012.

- 4 Der US-amerikanische Umwelthistoriker Donald Worster erkennt „auf jeder Seite“ „Webfehler des Ideals“ und „schwerwiegende Defekte“: Natur wird im Gedankenkonstrukt von „Nachhaltigkeit“ im Brundtlandbericht allein zur menschlichen Bedürfnisbefriedigung und als lediglich auszubeutende Ressource bei unhinterfragter Akzeptanz tradierter materialistischer Ansichten und unzureichenden Kenntnissen hinsichtlich der Steuerung menschlicher Eingriffe in Ökosysteme gedacht. Worster, Donald: Auf schwankendem Boden. Zum Begriffswirrwarr um „nachhaltige Entwicklung“, in: Sachs, Wolfgang (Hg.): Der Planet als Patient. Über die Widersprüche globaler Umweltpolitik, Berlin 1994, S. 109-110. Steinsiek, Peter-Michael: Nachhaltigkeit auf Zeit. Waldschutz im Westharz vor 1800. Diss. Uni. Göttingen 1998. Münster, New York, München, Berlin 1999. (Cottbuser Studien zur Ge-

schichte von Technik, Arbeit und Umwelt 11), S. 78, Fußnote 122, zeigt, dass in Akten der Harzer Forstverwaltung der Ausdruck „nach halten“ deutlich vor Carlowitz auftaucht.

- 5 Hamberger, wie Anmerkung 6, S. 26.
- 6 Vgl. Pohl, Norman; Deutsch, Mathias: Umweltgeschichte Sachsens. Ausgewählte Text- und Bilddokumente, Leipzig 2013, S. 11 und S. 22-24, mit weiteren Nachweisen. Dazu auch Herrmann, Bernd: Umweltgeschichte. Eine Einführung in Grundbegriffe, Berlin, Heidelberg 2013, S. 207, 248, 323.
- 7 Weltkommission für Umwelt und Entwicklung: Unsere gemeinsame Zukunft. Grevén 1987, S. 46.
- 8 Epiktet (etwa 50 bis 120 n. Chr.), Lehrgespräche, 4.1 Wie werde ich wirklich frei? Nach der Ausgabe Epiktet, Teles und Musonius. Wege zum Glück. Auf der Grundlage der Übertragung von Wilhelm Capelle neu übersetzt, mit Anmerkungen versehen und eingeleitet von Rainer Nickel. Darmstadt 1987, S. 147/148.

Die Indium-Germanium-Bronzeplatte auf dem Schloßplatz

Hartmut Stöcker, Dietrich Stoyan

Die Entdeckungen des Indiums und Germaniums sind sicherlich im internationalen und historischen Vergleich große wissenschaftliche Leistungen der Bergakademie Freiberg. Welche andere Universität gibt es, an der zwei stabile chemische Elemente entdeckt wurden? So ist es kein Wunder, dass Freiberg Denkmäler besitzt, die daran erinnern.

Seit 1910 steht im Albertpark an der Wallstraße das Denkmal für Clemens Winkler, den Entdecker des Germaniums. Und 2011 wurde dicht daneben den Entdeckern des Indiums, Ferdinand Reich und Hieronymus Theodor Richter, ein modernes Denkmal gewidmet. Nur etwa 100 Meter daneben wurde im März 2013 ein weiteres sich auf Indium und Germanium beziehendes Denkmal – eine Bronzeplatte vor dem Eingang ins Schloss – eingeweiht. Wie kam es dazu?

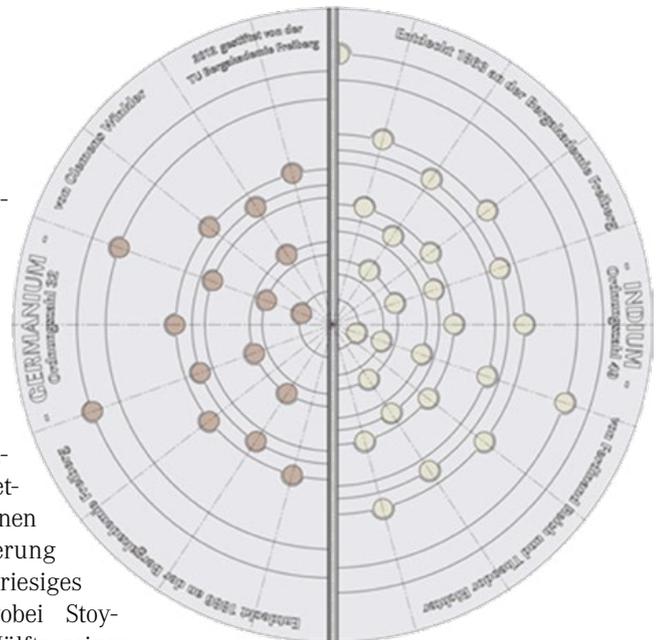
Bereits in den 1990er-Jahren gab es Pläne, das Hauptgebäude der Bergakademie zu renovieren. Der Freiburger Architekt Dr. Volker Benedix lieferte dazu einen Entwurf für die Gestaltung des Foyers. Er wollte auf seinem Fußboden, den ganzen Raum füllend, das Atommodell des Germaniums abbilden. Es blieb bei dem Entwurf.

Im Jahr 2011 wurde der Schloßplatz umgestaltet. Dazu gehörte eine Serie konzentrischer Kreise mit dem Mittelpunkt unmittelbar vor der Brücke über den Schlossgraben. Ein Entwurf dazu wurde in der „Freien Presse“ veröffent-

licht. Das Bild der konzentrischen Kreise erinnerte den Altrektor Dietrich Stoyan an den Entwurf von Benedix, an das Atommodell. Er schlug daher vor, die Kreise auf dem Schloßplatz als Elektronenbahnen zu interpretieren, in das Zentrum den Atomkern zu setzen und auch die Elektronen durch eine spezielle Pflasterung zu gestalten. Das wäre ein riesiges Atommodell geworden, wobei Stoyan beide Elemente je zur Hälfte zeigen wollte. Der Vorschlag kam zu spät, die Planungen waren bereits zu weit fortgeschritten. Und man hätte ja das ganze Bild nur verstanden, wenn man über den Schloßplatz geflogen wäre. So kam es zu der Idee von Benedix, im Zentrum der konzentrischen Kreise eine Bronzeplatte mit Atommodellen zu platzieren. Wie Benedix bei ihrer Einweihung schön sagte: „Der Schloßplatz mit dem Ausrufezeichen Schloss Freudenstein bekommt nun quasi den Punkt zum Ausrufezeichen mit dieser Bronzeplatte dazu.“

Die Herstellung der Platte

Die kreisrunde Gedenkplatte – entworfen vom Architekten Dr. Volker Benedix und Diplom-Formgestalter Jochen Schmieder – veranschaulicht den Atomaufbau der chemischen Elemente



Indium und Germanium jeweils zur Hälfte in einem schematischen Atommodell. Die Elektronen in der Atomhülle werden dabei durch gelbe und rote Granitsteine entsprechend der Pflasterung des Schloßplatzes symbolisiert. Neben Architekt und Universität ermöglichten auch die Nickelhütte Aue GmbH und die Kunstguss Lauchhammer GmbH die Finanzierung der Bronzeplatte.

Bei der Gestaltung der Bronzeplatte waren einige gestalterische und praktische Herausforderungen zu berücksichtigen. Natürlich sollten die Elektronen und deren Bahnen so angeordnet werden, dass möglichst viel physikalische und chemische Information erhalten bleibt. Zum Beispiel wurden die Bahnradien zunächst exakt berechnet, aber dann leicht angepasst, um die Erkenn-



Prof. Dr. Michael Stelter, Prorektor Forschung der TU Bergakademie Freiberg (links), und Architekt Dr. Volker Benedix bei der Betrachtung der noch im Lager befindlichen Bronzeplatte

barkeit, aber auch die Machbarkeit nicht zu gefährden.

Andererseits sollte die Bronzeplatte von allen Passanten, auch behinderten, begehbar sein, den Wasserablauf erlauben und überhaupt herstellbar bleiben. Schließlich fiel die Entscheidung, die Elektronenbahnen als von innen nach außen abfallende Stufen zu gestalten und die „Elektronen“ als Steine in die Platte einzulassen.

Durch die Aufteilung der Platte in zwei Hälften – für Indium und Germanium – war für jedes Atom nur die halbe Elektronenzahl darstellbar. Für das Indium-Atom mit 49 Elektronen musste also ein „halbes Elektron“ angefertigt und eingelassen werden.

Physik und Chemie auf der Platte

Die Bronzeplatte zeigt jeweils zur Hälfte schematische Atommodelle der beiden Elemente Indium und Germanium. Die Ordnungszahl gibt Auskunft über die Stellung der Elemente im Periodensystem der chemischen Elemente (PSE) und entspricht der Anzahl der Elektronen in der Atomhülle. Die konzentrischen Halbringe stellen Schalen dar, auf denen sich die Elektronen um den Atomkern bewegen, so wie es dem von Nils Bohr im Jahr 1913 entwickelten Atommodell entspricht. Im Atommodell auf der Bronzeplatte ist die Unterteilung dieser Schalen in einzelne Orbitale gezeigt. Den Elektronen, die sich am weitesten vom Kern entfernt aufhalten,

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H Wasserstoff							2 He Helium
2	3 Li Lithium	4 Be Beryllium	5 B Bor	6 C Kohlenstoff	7 N Stickstoff	8 O Sauerstoff	9 F Fluor	10 Ne Neon
3	11 Na Natrium	12 Mg Magnesium	13 Al Aluminium	14 Si Silizium	15 P Phosphor	16 S Schwefel	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
4	19 K Kalium	20 Ca Calcium	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
5	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Iod	54 Xe Xenon
6	55 Cs Cäsium	56 Ba Barium	81 Tl Thallium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
7	87 Fr Francium	88 Ra Radium						

kommt eine besondere Bedeutung zu. Nur diese sog. Valenzelektronen können chemische Bindungen eingehen und sind daher für die Chemie des jeweiligen Elements verantwortlich. Germanium mit der Ordnungszahl 32 ist ein Element der 4. Hauptgruppe des Periodensystems, d. h., sein Atom besitzt vier Außen-elektronen. Es verhält sich daher ähnlich wie das bekannte Halbleiterelement der gleichen Hauptgruppe, Silizium; die Valenzelektronen können sich schon bei einem geringen Energieeintrag bewegen – eine grundlegende Eigenschaft der Materialklasse der Halbleiter. Germanium wird zur Herstellung von Lichtleitkabeln und von Strahlungsdetektoren, in der Hochfrequenztechnik und in der Optik eingesetzt. In Freiberg sind in der DDR-Zeit ca. 40 t Germanium als Reinstoff produziert worden.

Indium mit der Ordnungszahl 49 ist ein Element der 3. Hauptgruppe und besitzt drei Außenelektronen. Es verhält sich ähnlich wie Aluminium, schmilzt aber bereits bei 157 °C. In Verbindung mit anderen Elementen kann auch Indium in halbleitenden Materialien Anwendung finden. Aktuell kommt der Großteil des Indiums allerdings in der Verbindung Indiumzinnoxid als transparente Elektrode in Geräten mit berührungsempfindlichem Display zum Einsatz.

Die Einweihung

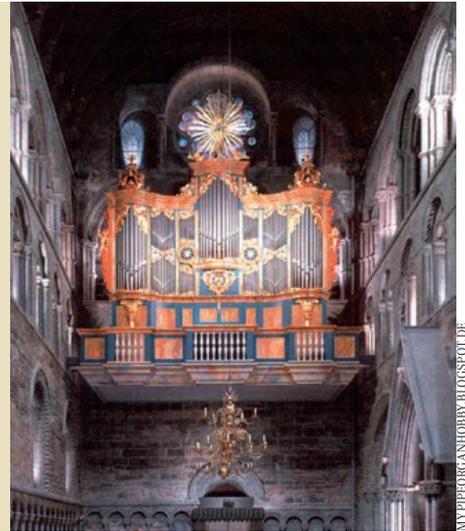
Am 22. März 2013 wurde bei starker Kälte die Bronzescheibe von zwei Metern Durchmesser in den Boden eingelassen. Dabei sagte Prof. Dirk C. Meyer, Prorektor für Strukturentwicklung der Ressourcenuniversität: „Der Prozess der Entstehung war ein schönes Gemeinschaftswerk. Seitens der Universität haben sich Kollegen der theoretischen und der Festkörperphysik ebenso beteiligt wie Bohrtechniker.“ In seiner Begrüßung der gut 100 Gäste freute sich Meyer darüber, dass die Bronzeplatte „auf dem Schloßplatz als zentralem Ort der Stadt und als Teil des Wissenschaftskorridors zwischen Universitätshauptgebäude und Campus der TU Bergakademie nun ihren angemessenen Platz findet.“

Holger Reuter, Bürgermeister für Stadtentwicklung und Bauwesen, ergänzte, dass „nun alle Freiburger ihren Gästen erklären können, wie die Atomstruktur der in Freiberg entdeckten Elemente aussieht.“ Zudem sei die Bronzeplatte Ausdruck des guten Zusammenwirkens zwischen Stadt und Universität.



Große Silbermannorgel im Freiburger Dom St. Marien

Trondheim und Freiberg: vertraute Klänge



Die Wagner-Organ im Trondheimer Nidaros-Dom

Im Juni dieses Jahres weilte der Trondheimer Organist Per Fridtjov Bonsaksen in Freiberg. Die Konzerte, die er am 12. Juni auf der Silbermannorgel in der Petrikerche und am 13. Juni 2013 auf den beiden Silbermannorgeln im Dom gab, waren für ihn etwas ganz Besonderes – nicht nur, weil es das für jeden Organisten ist, der auf den Silbermannorgeln spielen darf, sondern auch, weil eine „seiner“ Orgeln im Nidaros-Dom in Trondheim sozusagen eine „Verwandte“ der Freiburger Silbermannorgeln ist.

Der Orgelbauer Joachim Wagner, der in der Mitte des 18. Jahrhunderts mit dem Bau einer neuen Orgel für den Nidaros-Dom beauftragt wurde, hatte zwei Jahre lang – von 1717 bis 1719 – in der Werkstatt Gottfried Silbermanns in Freiberg gearbeitet. Vermutlich hat er hier auch einen weiteren Silbermann-Schüler, der später ebenfalls bekannt werden sollte, getroffen: Zacharias Hildebrandt. 1719 jedenfalls ließ sich Wagner als Orgelbauer in Berlin nieder. Sein erster selbstständiger Auftrag war dort der Bau der großen Orgel in der Marienkirche. Wie einige Jahre zuvor, als der junge Gottfried Silbermann mit gerade erst 27 Jahren den Auftrag für den Bau der (großen) Orgel im Freiburger Dom erhalten hatte, war es auch in Berlin aufsehenerregend, dass ein so junger Orgelbauer – Joachim Wagner war damals 29 Jahre alt – diesen bedeutenden Auftrag erhielt.

Wagner war als Orgelbauer von Anfang an sehr erfolgreich und schon zu seinen Lebzeiten bekannt. Selbst der König gab mehrere Orgeln bei ihm in Auftrag. 1739 dann wurde zwischen Wagner und der Trondheimer Domkirche der Vertrag zum Bau der Orgel für den Nidaros-Dom unterzeichnet. Diese Orgel

blieb allerdings die einzige, die Wagner für einen Dom außerhalb der Mark Brandenburg baute.

1994 wurde die Wagner-Organ im Trondheimer Nidaros-Dom restauriert und erfreut seit 1995 wieder die Besucher des Doms. Vier Jahre später, im Jahr 1998, weilte der damalige Freiburger Domkantor und -organist Dietrich Wagner zu einem Konzert in Trondheim; im Jahr 2012 durfte er ein zweites Mal ein Orgelkonzert im Nidaros-Dom geben.

Doch zurück nach Freiberg: Zu den Besuchern des diesjährigen Konzerts Per Fridtjov Bonsaksens im Freiburger Dom gehörten auch Studenten der TU Bergakademie Freiberg. Unter ihnen Anne Frehle, die Trondheim gut kennt, hat sie doch dort 2011 einen mehrmonatigen Studienaufenthalt absolviert, und Franz Lehmann, der selbst Musik macht – wenn auch ganz andere. Beide waren begeistert. Überrascht hatten sie vor allem die progressiven – düster und mystischen – Klänge, die Bonsaksen den „alten“ Orgeln entlockte.

Das erste Mal war es für Per Fridtjov Bonsaksen nicht, dass er auf den Freiburger Silbermannorgeln spielte. Angefangen hatte alles bereits 1997. Damals gab es in Freiberg anlässlich der Tausendjahrfeier der Stadt Trondheim mehrere Aktivitäten. Den kulturellen Höhepunkt bildete am 14. Oktober 1997 ein Sonderkonzert im Freiburger Dom. Bonsaksen spielte damals auf den beiden Silbermannorgeln Werke von Brahms, Bach und Buxtehude.

Bei seinem Besuch in diesem Jahr war Bonsaksen sichtlich angetan von den Veränderungen, die es in Freiberg seit seinem ersten Konzert gegeben hat. Die

farbenfrohe, restaurierte Innenstadt war für ihn kaum wiederzuerkennen. Fasziniert hat ihn auch der Schloßplatz, wo ja nicht nur die Silbermanngesellschaft ihren Sitz hat, sondern der heute vor allem durch das Schloss Freudenstein und das Krüger-Haus dominiert wird. An die Besichtigung der „terra mineralia“ wird er sich sicher noch lange erinnern.

Die „Verwandtschaft“ zwischen den Orgeln in Freiberg und Trondheim ist nicht die einzige interessante musikalische Verbindung, die es zwischen den beiden Städten gibt. So hat Trondheim ein wunderschönes Musikinstrumenten-Museum, übrigens das einzige in Norwegen. Auch dieses kann auf eine gewisse „Verwandtschaft“ – zumindest jedoch auf eine Verbindung – mit Freiberg verweisen. Der Bruder des Gründers dieses Museums, Ole Andreas Bachke, hatte einst an der Freiburger Bergakademie studiert. Er wurde am 11. Oktober 1897 immatrikuliert und schloss sein Studium 1899 als Diplom-Ingenieur ab. Auf seinem Matrikel-Bogen ist auch vermerkt, dass sein Vater Königlicher Bergmeister A.B. in Trondheim war. Der Sohn sollte in die Fußstapfen des Vaters treten.

Erhalten sind außerdem Schriftstücke „in der Strafsache“ gegen den Bergakademiker Ole Andreas Bachke wegen Beamtenbeleidigung, u. a. mit einem Vermerk: „Der Angeklagte hat die erkannte Strafe noch nicht bezahlt.“ Er war zu einer Geldstrafe in Höhe von 10 Mark verurteilt worden. Diese wurde ihm allerdings inzwischen erlassen: Als im Jahr 1999 eine Festveranstaltung anlässlich des fünfjährigen Jubiläums des Partnerschaftsvertrags Verbundnetz Gas AG Leipzig / NTNU Trondheim / TU Berg-



Das Ringve-Museum auf der Lade-Halbinsel vor den Toren der Stadt Trondheim

akademie Freiberg stattfand, wurde diese im Ringve-Museum durchgeführt. Der damalige Prorektor für Forschung der Bergakademie, Prof. Oettel, „erließ“ symbolisch die noch ausstehende Strafe des Freiburger Absolventen. Vielleicht hatte ja Bachke, ein gut ausgebildeter Ingenieur, sein Geld lieber gespart und damit musikalisch-kulturelle Zwecke unterstützt?!

Das Musikinstrumenten-Museum in Trondheim jedenfalls wurde von seinem Bruder, Christian Anker Bachke, und dessen Frau Victoria gegründet. Das Gut, auf dem sich das Museum befindet, war bereits 1878 vom Bergmeister Anton Sophus Bachke erworben worden. 1916 hat es dann Christian Anker Bachke von seinem Vater übernommen. Er war Geschäftsmann und einige Jahre belgischer Konsul in Trondheim, ging aber auch anderen Interessen nach. Zu seinen Leidenschaften gehörte die Musik. Er war selbst ein guter Klavierspieler und veranstaltete gern Konzertabende. 1920 heiratete er die charmante, in Russland geborene Victoria Rostin, die selbst aus einer Musikerfamilie stammte und seine Musikbegeisterung teilte.

Die Ehe blieb kinderlos, und so vereinbarten beide später, dass aus ihrem Erbe ein musikhistorisches Museum entstehen sollte. Das Ehepaar Bachke hatte schon mit dem Sammeln von Musikinstrumenten begonnen. Als Christian Anker Bachke im Jahr 1946 starb, setzte sich seine Frau tatkräftig für die Einrichtung des Museums ein. Seitdem haben Musikinstrumente aus aller Welt den Weg nach Trondheim gefunden. Im Oktober 1952 konnte das Museum, das auch eine reichhaltige Sammlung von

Noten sowie ein umfassendes Ton- und Bildarchiv besitzt, eröffnet werden. Heute ist das Ringve-Museum Norwegens Nationalmuseum für Musik und Musikinstrumente.

Berührungspunkte zwischen Trondheim und Freiberg gibt es schon seit Jahrhunderten. Dass die Beziehungen zwischen beiden Universitätsstädten heute ganz besonders lebendig sind, ist maßgeblich der Verbundnetz Gas AG zu verdanken. Seitdem 1994 der dreiseitige Partnerschaftsvertrag Verbundnetz Gas AG Leipzig / NTNU Trondheim / TU Bergakademie Freiberg unterzeichnet worden ist, haben 177 Freiburger Stipendiaten ein Teilstudium oder ein Prakti-

kum in Trondheim absolviert. Auch in diesem Semester haben sich wieder 13 Freiburger Studenten auf den Weg nach Trondheim gemacht, darunter Robert Löwe. Im Dom ist er schon gewesen, und das Musikinstrumenten-Museum wird er auch noch besuchen. Er selber spielt übrigens Gitarre und schwärmt von der Musiklandschaft Trondheims.

An der TU Bergakademie Freiberg kann man zwar keine musikalische Ausbildung bekommen – dafür aber werden am Internationalen Universitätszentrum u. a. Norwegischkurse angeboten. Denn nicht nur Musik verbindet, sondern auch Sprachen.

■ Birgit Seidel



Im Rahmen der Festlichkeiten im Jahre 1997 gab es ein wunderbares Konzert des norwegischen Studentenensembles „Snaustrinda“. Anlass dafür war die Eröffnung einer Ausstellung im Freiburger Rathaus, die einerseits die tausendjährige Geschichte der Stadt Trondheim sowie die jahrhundertelangen Beziehungen zwischen Sachsen und Norwegen dokumentierte und andererseits die aktuelle Zusammenarbeit zwischen der TU Bergakademie Freiberg und der NTNU Trondheim beleuchtete.

100. Geburtstag von Werner Lange

Gottfried Jäckel¹, Christian Wegerdt²

Prof. Dr.-Ing. Werner Lange, Metallhütten- und Werkstoffwissenschaftler, akademischer Lehrer und Gestalter wichtiger Bereiche der metallurgischen Industrieforschung der DDR in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts, wäre am 18. Juli 2013 100 Jahre alt geworden.

Persönlichkeit und Fachkompetenz prägten sein Wirken als langjähriger Direktor des Forschungsinstituts für Nichteisenmetalle Freiberg (FNE), als Hochschullehrer an der Bergakademie Freiberg und der Technischen Universität Dresden sowie als Leiter von Expertengremien der Akademie der Wissenschaften und des Forschungsrats der DDR.

Die TU Bergakademie Freiberg und die GfE Fremat GmbH Freiberg nahmen diesen 100. Geburtstag zum Anlass, Leben und Werk von Prof. Dr.-Ing. Werner Lange in einem Ehrenkolloquium am 18. Juli 2013 im Hörsaal der GfE Fremat GmbH Freiberg (vormals FNE) zu würdigen. Bei diesem Kolloquium wurden verschiedene interessante Vorträge gehalten. Eingebettet in die Vorstellung des Lebenslaufs von Werner Lange durch Prof. G. Jäckel sprachen Prof. B. Meyer zu W. Lange an der Bergakademie, Prof. G. Graf zu W. Lange im FNE und im Forschungsrat, Prof. H.-H. Emons zu W. Lange an der Akademie der Wissenschaften, Prof. W. Pippel zu W. Lange am Dresdner Institut für Isotopenanwendung und Dr.-Ing. D. Rühlicke zu den Verbindungen zwischen Metallkundeinstitut der TU BA und dem Edelmetall-Verarbeitungsbetrieb Halsbrücke.

Adolf Werner Lange wurde am 18. Juli 1913 als Sohn des Unternehmers Albert Lange in Auerhammer geboren. Nach dem Schulbesuch in Aue führten ihn ein Maschinenbau-Studium nach München und anschließend ein Metallhüttenstudium nach Berlin-Charlottenburg, das er 1937 abschloss. Bei Ernst Justus



Werner Lange (1913–1992)

Kohlmeier promovierte er 1941 mit dem Thema „Die thermodynamischen Eigenschaften der Metalloxyde und ihre Anwendung auf hüttenmännische Probleme“, einer Thematik, der er in seinen wissenschaftlichen Neigungen stets verbunden blieb. Nach kurzer Assistentenzeit in Berlin arbeitete Werner Lange im väterlichen Betrieb in Auerhammer, der F.A.Lange Metallwerke AG, zuletzt als Betriebsleiter.

Als 32-Jähriger stellte sich Werner Lange nach Kriegsende dem Wiederaufbau im Osten Deutschlands zur Verfügung. Hervorhebenswert sind die Leitung des Metallhütteninstituts der Bergakademie 1947 bis 1949 und des Zentralamts für Forschung und Technik bei der Deutschen Wirtschaftskommission in Berlin 1949 bis 1955.

Sein Berufsweg setzte sich in verschiedenen staatlichen und wissenschaftlichen Funktionen kontinuierlich fort. Die mittleren 1950er-Jahre, also 1954 bis 1957, waren für den 40-jährigen Werner Lange besonders ereignisreich und bestimmend für den weiteren Lebensweg: Er wurde zum Direktor des neu aufzubauenden Instituts für Anwendung radioaktiver Isotope an der TH Dresden ernannt. Die Akademie der Wissenschaften beauftragte ihn mit dem Aufbau einer Arbeitsgruppe Metallurgie. Er wurde später zum Mitglied der Akademie der Wissenschaften gewählt und übernahm den Aufbau der Klasse Metallurgie/Werkstoffwissenschaften. Werner Lange gehörte zu den Gründungsmitgliedern des Forschungsrats der DDR.

Das wichtigste Ereignis war jedoch zweifellos die Übernahme der Leitung

des FNE. Vom 1. Mai 1956 bis 8. Januar 1979 war Prof. Werner Lange Institutsdirektor des Forschungsinstituts für Nichteisenmetalle Freiberg.

Schwerpunkte in seiner mehr als 22-jährigen Institutsleitung waren insbesondere folgende Komplexthemen:

- Technologien für die Reinstmetall-Gewinnung als Elektronikwerkstoffe (die Gründung des VEB Spurenmetalle erfolgte auf seine Anregung hin)
- Entwicklung hochwarmfester Nickel-Legierungen als Basislegierungen
- Gewinnung von Tonerde aus einheimischen Tonen zur Aluminiumproduktion
- Vakuumschmelzen von Nichteisen-Metallen in Induktionsöfen
- Technologien zur Verhüttung von Armkonzentraten aus einheimischen Zinnerzen
- Entwicklung von Mikrodrähten zur Verbindung von aktiven und passiven Elektronik-Bauteilen
- Nutzung der Isotopentechnik für die Beherrschung metallurgischer Prozesse
- Entwicklung von Al-Leitlegierungen zur Cu-Substitution
- Forschungsbereich Edelmetalle FNE/Verarbeitungsbetrieb Halsbrücke
- Nutzung der Rechentechnik für F/E-Projekte und Prozessmodellierung
- Prognosearbeiten für Konstruktionswerkstoffe und Stoffkreisläufe (Blei, Aluminium)

Als Wissenschaftler, als Wissenschaftslenker und Hochschullehrer pflegte Prof. Werner Lange eine komplexe Denk- und Arbeitsweise, die sich nicht nur mit Forschung und Entwicklung allein befasste, sondern immer gleichzeitig nach den Effekten aus der Anwendung in der künftigen Produktion fragte und rückkoppelte.

Von Werner Lange stammen über 70 wissenschaftliche Veröffentlichungen, wobei interne Ausarbeitungen für wissenschaftliche und staatliche Gremien nicht berücksichtigt sind.

Er prägte 1949 die Wortmarke „Berg- und Hüttenmännischer Tag“, einer wissenschaftlichen Veranstaltung, die an der TU Bergakademie seit über 60 Jahren läuft.

Werner Lange hat 30 Promotions- bzw. Habilitationsverfahren als Gutachter betreut. Sein Wirken fand Anerkennung in zahlreichen hohen Auszeichnungen. 1983 verlieh ihm die Bergakademie Freiberg die Würde eines Doktor-Ingenieurs ehrenhalber.

¹ Prof. Dr. Gottfried Jäckel, langjähriger geschäftsführender Gesellschafter des FNE Forschungsinstituts für Nichteisen-Metalle GmbH Freiberg i.R.

² Prof. Dr. Christian Wegerdt, langjähriger geschäftsführender Gesellschafter der IMA GmbH Dresden i.R.; (beide Autoren haben unter Prof. Dr. Werner Lange promoviert)

Der andere Gellert

Zum 300. Geburtstag von Christlieb Ehregott Gellert

Mike Haustein¹

Christlieb Ehregott Gellert, geboren am 11. August 1713 in Hainichen, gilt als Wegbereiter der metallurgischen Chemie. Seine Lehrbücher fanden im In- und Ausland Beachtung und wurden in mehrere Sprachen übersetzt. Er gehörte zum ersten Lehrkörper der Bergakademie und war maßgeblich an der Einführung der Silber-Amalgamation im Freiburger Hüttenwesen beteiligt. Dennoch scheint es, dass er nie aus dem Schatten seines jüngeren Bruders, des berühmten Dichters Christian Fürchtegott Gellert (1715–1769), heraustreten konnte. Die Frage, ob es allein das wissenschaftliche Werk des Jubilars rechtfertigt, des „anderen Gellert“ noch heute zu gedenken, mag der Leser selbst entscheiden.

Chemie und Alchimie

Chemie und Alchimie sind in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts noch nicht eindeutig voneinander zu trennen.

Noch immer wird die Transmutation der Metalle für möglich gehalten. Herrscher wie August der Starke geben große Summen für selbsternannte Goldmacher aus. Bezeichnend ist aber auch, dass der Alchimist Böttger unter dem Druck des sächsischen Kurfürsten die aussichtslose Metallumwandlung aufgab und 1708 eine brauchbare Porzellanrezeptur entwickelte.

Als irrig, aber dennoch fördernd für die Entwicklung der Chemie, kann die Lehre vom Phlogiston, dem feurigen Wesen, das den Stoffen innewohnen sollte, angesehen werden. Sie wurde wesentlich von Georg Ernst Stahl (1659–1734) geprägt. Demnach sollten die Stoffe aus einem unveränderlichen Bestandteil und mehr oder weniger Phlogiston bestehen. Bei der Verbrennung entweicht nun das Feuerwesen, zurück bleibt der „Kalk“. Schwefel und Kohlenstoff, die bei der Verbrennung keine bzw. kaum Rückstände liefern, wurden konsequenterweise als beinahe aus reinem Phlogiston



Abb. 1: Christlieb Ehregott Gellert (1713–1795)

bestehend interpretiert. Die Theorie ließ sich scheinbar sogar beweisen. Wenn man nämlich den Kalk eines verbrannten Metalls (z. B. des Eisens) mit Phlogiston (hier Kohlenstoff) erhitzte, war der Vorgang sogar umkehrbar. Erste Zweifel an der Existenz des Feuerstoffs regten sich in den 70er-Jahren des 18. Jahrhunderts. Dabei war die von Antoine de Lavoisier (1743–1794) aufgestellte Oxidationstheorie, die sich erst am Ende des 18. Jahrhunderts durchsetzte, keineswegs die einzige antiphlogistische Anschauung jener Zeit.

Der Weg zu den Naturwissenschaften

Christlieb Ehregott Gellert war der mittlere von drei Söhnen des Hainichener Pfarrers Christian Gellert, die das Erwachsenenalter erreichten. Wie seine Brüder besuchte er die renommierte Fürstenschule St. Afra in Meißen. Neben alten Sprachen, die den Hauptteil des Lehrplans ausmachten, gab es hier bereits zaghafte Ansätze der Vermittlung von Mathematik und Geografie. Im Juni 1732 wird er zum Studium an der Universität Leipzig zugelassen. Leider

existieren außer seinem Namen in der Matrikelliste keine weiteren belastbaren Aufzeichnungen. Vermutlich besuchte er Vorlesungen philosophischen Inhalts. Fest steht, dass Gellert am 30. April 1735 an der Universität Wittenberg sein Studium mit dem Magistergrad abschloss.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass er noch in Leipzig den Assessor Johann Georg Lotter (1712–1737) kennenlernte, der einen Ruf an die noch junge Kaiserliche Akademie der Wissenschaften nach St. Petersburg erhalten hatte. Durch Lotters Vermittlung erhielt Gellert die Stelle des Konrektors des akademischen Gymnasiums St. Petersburg und begann im Juni 1735, Unterricht in Geschichte, Geografie und Logik zu erteilen. Das Konzept der Akademie, Fachkräfte aus dem Ausland anzuwerben, geht noch auf Zar Peter I. (1672–1712) zurück, der große Anstrengungen zur Erneuerung Russlands unternahm. Jedenfalls fand sich Gellert nun in einem Kreis namhafter Gelehrter wieder. Beispielhaft sei nur der Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783) genannt, mit dem ihn eine lebenslange Freundschaft verbinden sollte.

Dieses wissenschaftliche Umfeld und gute experimentelle Möglichkeiten bildeten fortan den Nährboden für Gellerts naturwissenschaftliche Ausrichtung. Seine erste physikalische Abhandlung *Über die Erscheinungen beim Eingießen von Blei in Kapillaren* legte er im März 1739 vor.

Im Jahr 1741 wurde Gellert mit dem aus Freiberg nach St. Petersburg zurückgekehrten Michail Wassiljewitsch Lomonossow (1711–1765) bekannt. Während der russische Universalgelehrte mit seinem deutschen Lehrer, dem bekannten Bergrat Henckel (1679–1744), nicht so ganz harmonierte, stimmte zwischen den beiden fast gleichaltrigen Wissenschaftlern von Anfang an die „Chemie“. Sie legten Mineraliensammlungen an, und Lomonossow schrieb sein Lehrbuch der Metallurgie und des Erzbergbaus. Gellert konstruierte ein von Pferdekraft angetriebenes Hüttengebläse. Überhaupt interessierten sich die beiden Gelehrten nun durchweg für die Arbeit des Anderen.

Ohne Zweifel waren die Petersburger Jahre formend für den jungen Gellert,

¹ PD Dr. habil. Mike Haustein
Nickelhütte Aue GmbH
haustein@nickelhuette-aue.de

und die Bekanntschaft mit Lomonosow trug das ihre dazu bei, dass er 1744 als etablierter Naturforscher und Metallurge in die Heimat zurückkehrte.

Der Oberhüttenverwalter, Wissenschaftler und Hochschullehrer

Trotz seiner guten Referenzen ließ eine passende Anstellung im Staatsdienst zunächst auf sich warten. Gellert behalf sich mit der Übersetzung eines renommierten Provierbuchs von Johann Andreas Cramer (1710–1777) vom Lateinischen ins Deutsche. Es erschien 1746 unter dem Titel „Anfangsgründe der Provierkunst“. Im Gartenhaus seines Grundstücks am Petriplatz, heute Waisenhausstraße 10, richtet Gellert ein chemisch-metallurgisches Labor ein und erteilt Privatunterricht. Auch der Kurfürst möchte nun nicht länger auf seine Dienste verzichten; 1753 wird er zum Kommissionsrat ernannt und erhält damit eine beratende Funktion im Oberbergamt. In den Beständen des Bergarchivs Freiberg findet sich eine Vielzahl von Gutachten, die ein beredtes Zeugnis darüber ablegen, wie ernst er diese Verpflichtung nahm [siehe z. B. 1a]. Mit der Ernennung zum Oberhüttenverwalter im Jahr 1762 wird Gellert schließlich zum höchsten Beamten im sächsischen Hüttenwesen.

Einen wesentlichen Teil des wissenschaftlichen Nachlasses Gellerts verkörpern seine Lehrbücher. Die *Anfangsgründe zur metallurgischen Chymie* erschienen 1750/51 und wurden 1776 in erweiterter Form nochmals neu aufgelegt [2]. Im Spannungsfeld von analytisch-präparativer Chemie, Mineralogie und Metallurgie stellte er das Wissen seiner Zeit verständlich und praxisorientiert zusammen. Allein die Übersetzungen ins Französische, Englische und Italienische bezeugen, dass Gellerts Buch zu einem Standardwerk auf diesem Fachgebiet avancierte. Natürlich kann man ein solches Werk nur richtig bewerten, wenn man das moderne chemische Grundwissen ausblendet. Es ergibt sich dann der nachvollziehbare Ansatz, aus Beobachtungen und reproduzierbaren experimentellen Ergebnissen allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten abzuleiten.

Gellert definiert Erden, Steine und Salze sowie sieben Metalle und vier Halbmetalle. Antimon, Arsen, Zink und Wismut werden von den klassischen Metallen (Gold, Silber, Kupfer, usw.) durch ihre geringere Schmiedbarkeit und

ihre Flüchtigkeit beim Schmelzen abgegrenzt. Ausführlich stellt er die Erkenntnisse zu den bis dato bekannten Erzen zusammen. Weitere Abschnitte widmen sich dem chemischen Arbeiten und den dazu nötigen Geräten und Chemikalien.

Bemerkenswert ist Gellerts Verzeichnis der „natürlichen Schwere unterirdischer Körper“. Auf insgesamt zehn Seiten stellt er die Dichten verschiedener Metalle, Minerale und Gesteine zusammen. Verblüffend ist, dass viele Werte ihre Gültigkeit behalten haben. So gibt er beispielsweise für Gold 19,6 und für Blei 11,3 als Dichte an, was fast exakt den heute verwendeten Daten in der Einheit g/ml entspricht. Und das in einer Zeit, als die Masse u. a. in Pfund, Lot oder Grän und das Volumen in Kannen gemessen wurden! Erklärbar wird dieser Umstand, wenn man in Betracht zieht, dass Gellert als Grundlage seiner Bestimmungsmethode den jeweiligen Gewichtsverlust in Wasser wählte. Da auch das spätere metrische System einem Gramm Wasser ein Volumen von einem Milliliter zuwies, hat er unbewusst Werte ermittelt, die von dauerhafter Gültigkeit sind. Die Zusammenstellung der damaligen chemischen Symbole mutet dagegen noch sehr alchimistisch an; immerhin entstand die moderne chemische Zeichensprache erst ein gutes halbes Jahrhundert später. Durch die im zweiten Teil des Buches aufgeführten 97 Experimente und Zubereitungen werden die *Anfangsgründe zur metallurgischen Chymie* gleichsam zu einem Nachschlagewerk für das präparative chemische Arbeiten.

Mit Gründung der Bergakademie Freiberg im Jahre 1765 wurde dem Oberhüttenverwalter Gellert das metallurgisch-chemische Kollegium übertragen. Zweimal in der Woche, donnerstags und freitags, hielt er vormittags Vorlesungen, nachmittags fanden Praktika im Labor auf seinem Anwesen am Petriplatz statt. Diese nebenberufliche Lehrverpflichtung, wenn man sie so bezeichnen will, steht am Anfang der Entwicklung aller chemischen, metallurgischen und mineralogischen Institute der heutigen TU Bergakademie Freiberg. Während sich die Mineralogie unter Abraham Gottlob Werner (1749–1817) noch zu Lebzeiten Gellerts als eigenständiges Fach etablierte, erfolgte die Loslösung der Metallurgie von der Chemie erst nach seinem Tod.

Bis 1794, Gellert hatte sein 80. Lebensjahr überschritten, führte er seine

Lehrveranstaltungen weitgehend unverändert auf der Grundlage seines Buches fort. Sein Schüler Wilhelm August Lampadius (1772–1842) überreicht, als er ab April 1795 alle Lehrverpflichtungen des inzwischen kränkelnden Oberhüttenverwalters übernehmen soll, dem Oberbergamt eine Denkschrift [3]. Darin moniert er, dass seit der letzten Ausgabe des Lehrbuchs seines Vorgesetzten die Chemie „eine ganz veränderte Gestalt“ erhalten hätte und legt einen überarbeiteten Lehrplan vor.

Dem alternden Gellert wurde verschiedentlich angekreidet, dass er zeitweilig an der Phlogistontheorie festhielt [z. B. 4] und die Erkenntnisse Lavoisiers beharrlich ignorierte. Lampadius' revidierter Lehrplan relativiert diese Ansicht. Auch er vermittelt noch immer die Hypothese vom „brennlichen Wesen“, nur stellt er sie zwei weiteren Theorien gegenüber. Aus dem Lehrplan geht klar hervor, dass auch Lampadius zu diesem Zeitpunkt die Sauerstofftheorie Lavoisiers ablehnt. Nichtsdestotrotz folgt sein Lehrplan wesentlich moderneren Grundsätzen als Gellerts Handbuch. Es ist nun von „chemischen Operationen und Instrumenten“ die Rede, Begriffe wie Destillation, Sublimation und Kristallisation tauchen auf. Man spürt, dass die Zeitspannen zwischen den Erkenntnisprüngen kürzer werden. Dass ein beinahe 50 Jahre altes Lehrbuch von dieser Entwicklung schließlich überholt wurde, ist verständlich.

Die Amalgamation der Silbererze

Bereits 1710 hatte August der Starke die vielen kleinen Hütten im Freiburger Raum zur Generalschmelzadministration an den Standorten Muldenhütten und Halsbrücke zusammenfassen lassen. Das damit verfolgte Hauptziel, eine wirtschaftlichere Arbeitsweise durchzusetzen, wurde allerdings nur teilweise erreicht. Besonderes Kopfzerbrechen bescherten dem Oberhüttenamt die hohen Bleiverluste bei der Verarbeitung der Silbererze. Die mehr oder weniger bleihaltigen Erze wurden zunächst in Schachtöfen geschmolzen. In einem zweiten Schritt wurde das gewonnene silberhaltige Werkblei dem Treibprozess unterworfen, dessen Zweck darin bestand, das Blei zu Glätte (Bleioxid) zu oxidieren, bis nur das Silber zurückblieb. Das Blei konnte durch Frischen, d. h. durch erneute Reduktion der Glätte zum Metall, in den Prozess zurückgeführt werden.

In einer Denkschrift an das Oberhüttenamt beklagt Oberberghauptmann v. Ponickau die außerordentlich hohen Bleiverluste in den Jahren 1766 bis 1769 [1b]. So konnten aus 51.000 Zentnern Erz mit 24.000 Zentnern Blei nur etwa 5.500 Zentner Werkblei und Glätte, also nur gut ein Fünftel der Einsatzmenge gewonnen werden. Nachdrücklich weist er darauf hin, dass bei der Gründung der Generalschmelzadministration ein maximaler Bleiverlust von einem Drittel kalkuliert wurde. Gellert legt am 5. Dezember 1769 ein Gutachten vor, in dem er die Ursache des Problems benennt. Es sind die sog. „Dürrerze“, gemeint sind bleiarmer kiesige Spezies, bei deren Verarbeitung das Blei größtenteils verschlackt wird und somit verloren geht. Trotz intensiver Bemühungen gelingt es zunächst nicht, diesem Missstand gänzlich beizukommen. Limitierend für das Hüttenwesen wirkte sich darüber hinaus auch der hohe Holzkohleverbrauch der Schmelzöfen aus. Die Kapazität der heimischen Wälder war erreicht; immerhin wurden neben Brennmaterial auch große Quantitäten an Gruben- und Bauholz benötigt. Erst die Einführung eines für das Freiburger Hüttenwesen gänzlich neuen Verfahrens brachte eine dauerhafte Lösung der Probleme.

„Anquicken-Amalgamieren heißt: Metalle mittelst des Quecksilbers auflösen und mit demselben zu einer breyähnlichen Masse vereinigen ... Die Absicht dieser Verbindung ist: ... das Gold, Silber und andere mit dem Quecksilber verwandte Metalle von den beygemengten Unreinigkeiten zu scheiden ...“. So beginnt das 1786 erschienene und von vielen Metallurgen mit Ungeduld erwartete Werk „Über das Anquicken der gold- und silberhaltigen Erze“ (5) des Wiener K&K Hofrats Ignaz Edler von Born (1742–1791). Das Silber mittels eines hydrometallurgischen Verfahrens, das kaum Brennstoff erforderte, aus seinen Erzen zu ziehen, schien wie der Stein der Weisen zu sein.

Dabei war die Amalgamation alles andere als neu. Bereits in der Antike wusste man Quecksilber für die Gewinnung von Gold einzusetzen. Silbererze wurden seit Ende des 16. Jahrhunderts in den spanischen Kolonien in Südamerika amalgamiert, was den Europäern durchaus zur Kenntnis kam. Die Schilderungen des äußerst primitiv ausgeführten Verfahrens mussten aber eher abschrecken als zur Nachahmung anregen. Demnach wurden die gemahle-

nen Erze unter freiem Himmel erst mit Kochsalz und dann mit Quecksilber vermengt, stets feucht gehalten und mehrfach täglich durchgetreten. Zu dieser gesundheitsschädlichen Arbeit setzten die Kolonialisten vorzugsweise Indios ein. Das Silberausbringen war meist bescheiden, die Quecksilberverluste dagegen gewaltig. Das langwierige Verfahren bedurfte einerseits der südlichen Sonne, andererseits war es anfangs nur für reiche, möglichst gediegene Silbererze einigermaßen wirtschaftlich anzuwenden. Gellert gibt in seinem bereits erwähnten Lehrbuch [2] den aktuellen Wissenstand zur Silber-Amalgamation wieder, indem er schreibt: „... (man) suchet das Silber aus den Erzen auf diese Art nur an solchen Orten zu gute zu machen, wo reiches Silbererz und mehr gediegenes Silber ist, und wo man aus Mangel der Nahrungsmittel des Feuers, das Silber durch das Feuer nicht herausbringen kann.“

Aufbauend auf älteren Versuchen, die Verquickung der Silbererze zu verbessern bzw. in Europa einzuführen, nahm sich Ignaz von Born ab 1779 des Problems an. Er stellte alle verfügbaren Rezepte zusammen und führte eine Vielzahl von Experimenten durch. Das daraus abgeleitete Verfahren stellte er 1784 dem Kaiser Joseph II. vor, der daraufhin nicht nur den Aufbau eines Amalgamierwerkes im ungarischen Glashütte bei Schemnitz (heute Slowakei), sondern auch die Veröffentlichung der technologischen Einzelheiten befahl. So findet sich in Borns Buch eine detaillierte Beschreibung dieses ersten europäischen Amalgamierwerks wieder. Der offenerzige Umgang mit dem aufwändig erworbenen Wissen muss zunächst verwundern, war aber alles andere als uneigennützig. Immerhin besaß die Donaumonarchie in Idria (Krain, heute Slowenien) das einzige bedeutende Quecksilberbergwerk Mitteleuropas.

Als 1784 die ersten Nachrichten von Borns Methode in Sachsen eintrafen, erkannte Gellert die Chancen, die das Amalgamierverfahren bot. Die drückenden Schwierigkeiten des Sächsischen Hüttenwesens konnten mit dem neuen Verfahren gelöst werden. Das Oberhüttenamt stellte nun eine Kommission unter Leitung von Johann Friedrich Wilhelm v. Charpentier (1738–1805) zusammen, die 1786 nach Schemnitz reiste, um die neue Methode vor Ort in Augenschein zu nehmen. Gellert verzichtete auf die Führung der Expedition; immer-

hin war er zu diesem Zeitpunkt bereits 73 Jahre alt. Die Sächsischen Gelehrten nahmen an einem Kongress teil, der eigens zur Verbreitung des neuen Verfahrens einberufen wurde. Leider sind die entsprechenden Akten im Bergarchiv Freiberg nicht mehr zugänglich, sodass hier keine weiteren Erkenntnisse zu dieser Reise wiedergegeben werden können. Sicher ist, dass die Expeditionsmitglieder voller Begeisterung für die neue Methode nach Freiberg zurückkehrten und das Ansinnen zur Errichtung eines Amalgamierwerkes nach Bornschem Vorbild am 26. April 1787 dem Finanzministerium in Dresden einreichten. Die Anordnung zum Bau erging am 10. August 1787 [1c].

Gellert, in Korrespondenz mit Born stehend, prüfte das Verfahren sehr eingehend und fand schnell schwerwiegende Mängel. Borns Aussage, das Anquicken müsse durch Erwärmen des Gemenges auf 60 °Reaumur (75 °C) befördert werden, ließ der Oberhüttenverwalter nicht gelten. Die Feuerung verursachte nicht nur giftige Quecksilberdämpfe, sondern machte die ganze Anlage kompliziert und unkomfortabel. So wurden dickwandige, in Herde eingesetzte Kupferkessel zum Verquickern benutzt, die nach Beendigung des Prozesses mit Flaschenzügen ausgehoben werden mussten. Besonders nachteilig aber war der schnelle Verschleiß der Kessel. Schlug ein solches Kupfergefäß leck, was oft vorkam, lief das Quecksilber in die Herdfeuerung und verdampfte teilweise. Aus heutiger Sicht liegt der Nachteil der Kessel auf der Hand: Einerseits wird das Kupfer selbst amalgamiert, andererseits fungiert es als Reduktionsmittel für das beim vorhergehenden Rösten gebildete Silberchlorid. Kein Wunder also, dass die teuren Gefäße schon nach kurzer Zeit unbrauchbar wurden.

Für Gellert kam eine Übernahme dieses unzulänglichen Verfahrens nicht infrage. Insbesondere musste ein Weg gefunden werden, das Erhitzen des Quickbreies zu umgehen. So begann er ab Januar 1787 umfangreiche Versuche zur Amalgamation mit dem Ziel anzustellen, auf kaltem Wege möglichst viel Silber bei geringstem Quecksilberverlust auszubringen. Die erhalten gebliebenen Versuchsprotokolle vermitteln den Eindruck einer unermüdlichen, systematischen wissenschaftlichen Arbeit [1c]. Er untersuchte verschiedenste Erze, variierte die Kochsalzmenge beim Rös-

ten, die Quecksilberquantität beim Verquicken und suchte nach den günstigsten Möglichkeiten des Verwaschens und der Amalgamzersetzung.

Sein größter Wurf war die Erkenntnis, dass das Kupfer der Bornschen Kessel direkt an der Reaktion teilnahm. Anfangs setzte er deshalb noch Kupfer zu, dann wickelte er auf Eisenfeilspäne aus. Diese waren nicht nur preisgünstiger als das edlere Metall, sondern beförderten auch die Verquicken stärker. Allerdings ließen sich die Feilspäne nur schwer vom fertigen Amalgam trennen und verunreinigten das Silber. Das Problem behob er durch den Einsatz von geschmiedeten Eisenplättchen. Nun erreichte Gellert ein ebenso gutes Ausbringen wie im Falle der „warmen Methode“. Durchschnittlich fanden sich in den Rückständen nicht mehr als 5% des ursprünglich enthaltenen Silbers.

Die vielversprechenden Versuchsergebnisse legte der Oberhüttenverwalter Ende 1787 dem Oberbergamt vor. Zu diesem Zeitpunkt war der Rohbau des Halsbrücker Amalgamierwerks bereits fertiggestellt worden. Über die Inneneinrichtung indes herrschte noch Unklarheit. Um die günstigste Technologie zu finden, wurde im September 1787 auf der unteren Muldener Hütte eine Pilotanlage eingerichtet. Zunächst wurde mit hölzernen Zylindern experimentiert. Das Durchmengen des Quickbreies erfolgte mittels Kupfer- oder Eisenscheiben, die an Stangen angebracht, sich in den Zylindern auf und nieder bewegten. Auf den Gedanken, rotierende Holzfässer zur Verquicken einzusetzen, wurde Gellert durch v. Born gebracht. Nach Winkler [6] geht diese entscheidende Innovation auf Bergrat Rupprecht aus Glashütte zurück, wo man inzwischen auch auf die kalte Amalgamation umgestiegen war. Auf der unteren Muldener Hütte kamen am 4. Nov. 1787 erstmals Fässer zum Einsatz [1c]. Wenig später war klar, dass die kalte Anquicken in rotierenden Fässern die optimale Technologie für die Silberamalgamation darstellte. Bereits im Quartal Crucis (Juli-Sept.) 1788 konnten aus 800 Zentnern Erz 382 Mark Silber (ca. 89 kg) bei einem stattlichen Gewinn von 360 Talern ausgebracht werden [1d]. Die Pilotanlage wurde nun zum „kleinen Amalgamierwerk“, das fortan zur Ausbildung der künftigen Amalgamiermeister gute Dienste leistete. Es bestand noch längere Zeit neben seinem großen Pendant in Halsbrücke.

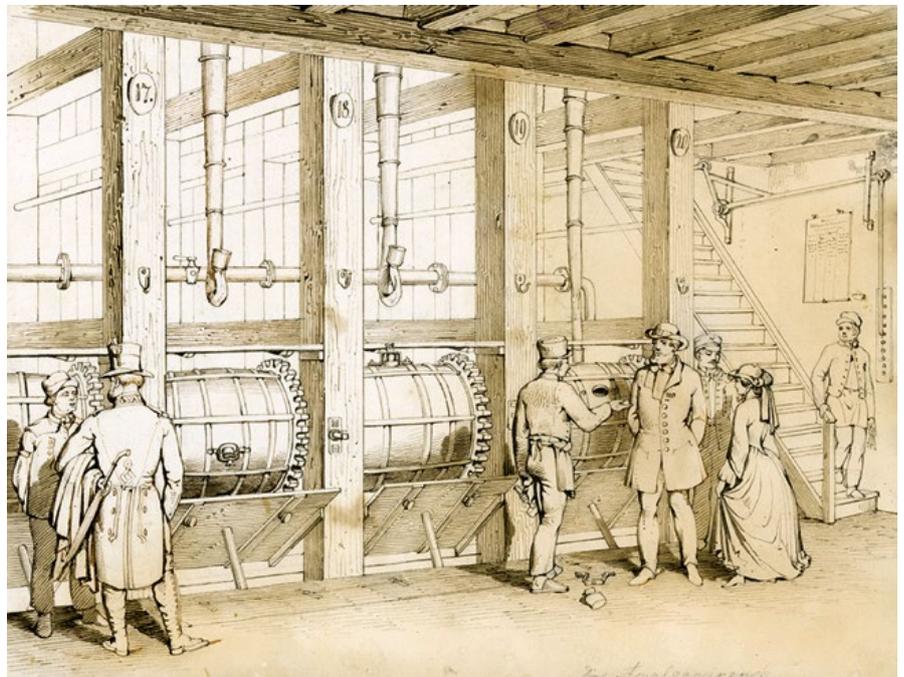


Abb. 2: Gäste im Anquicksaal des Amalgamierwerks, Zeichnung von Eduard Heuchler

Das 8. Weltwunder entsteht

Basierend auf Gellerts Vorgaben fertigte Charpentier die Entwürfe für die technische Ausstattung des Halsbrücker Werkes. Dabei war von vornherein klar, dass sich nicht alle Silbererze zur Verquicken eigneten. Zum Einsatz gelangten im Wesentlichen jene bleifreien, kiesigen (dürren) Erze, die bisher die hohen Bleiverluste beim Schmelzen verursacht hatten. Kupfer sollte möglichst nicht enthalten sein, auch zu hohe Arsen- und Antimonergehalte wirkten sich nachteilig aus. Das Erz wurde so verschnitten, dass in einem Zentner etwa 8 Loth Silber (0,25%) enthalten waren. Das gepochte Material gelangte auf den Schichtboden im ersten Obergeschoss des Amalgamiergebäudes und wurde hier mit 10–12% Kochsalz angemengt. Bei zu geringem Schwefelgehalt wurde zusätzlich etwas Schwefelkies oder Eisensulfat zugesetzt. Das Gemenge (ab 1794 etwa 200 Zentner pro Tag) gelangte portionsweise über Rutschen in die im Erdgeschoss aufgestellten Röstöfen. Die aus den Kiesen entweichenden schwefelsauren Dämpfe lösten ihrerseits das Chlor aus dem Kochsalz, was wiederum zur gewünschten Bildung des Hornsilbers führte. Die richtige Führung des Röstprozesses war entscheidend für ein gutes Silberausbringen.

Das Röstgut wurde gemahlen, gesiebt und gelangte über entsprechende Bunker in die beiden Anquicksäle mit je zehn Fässern (ab 1794 ein Saal mit 20 Fässern). Es wurden zunächst etwa drei Zentner Wasser vorgelegt und 10 Zentner Gemenge über eine Lutte eingefüllt.

Frischer Eisenplättchen bedurfte es nur, wenn jene aus der vorangegangenen Beschickung verbraucht waren. Nach etwa 2 Stunden Umlauf erfolgte die Zugabe von 5 Zentnern Quecksilber unter Zuhilfenahme einer hölzernen Leitung. Das Fass wurde verspundet und an die von einem Wasserrad angetriebene Welle eingerückt. Die Verquicken nahm etwa 14 Stunden in Anspruch. Das fertige Amalgam musste von noch enthaltenem Quecksilber getrennt werden. Gellert fand, dass eine einfache Filtration durch Zwillichbeutel diesen Zweck am besten erfüllte.

Um nun das Silber aus seiner Verbindung mit dem Quecksilber zu befreien, musste das Amalgam ausgeglüht werden. Die Schwierigkeit bestand darin, das kostbare flüssige Metall möglichst vollständig zurückzugewinnen. In Halsbrücke waren dazu Ausglühgewölbe mit eisernen Glocken, die oben bis zur Rotglut erhitzt wurden und mit ihrem unteren Teil in ein Wasserbad eintauchten, vorhanden. Das Amalgam wurde im Inneren auf Teller geschichtet, die an einer senkrechten Stange aufgereiht waren. Das Ausglühen, das etwa acht Stunden in Anspruch nahm, war neben dem Rösten der einzige Prozess, für den Brennmaterial erforderlich war. Durch eine günstige Ummantelung der Glocke und Optimierung der Zugverhältnisse gelang es Gellert, den Holzkohleverbrauch auf ein Minimum zu beschränken. Während das Quecksilber im Wasserbottich, in den die Glocke eintauchte, kondensierte, blieb das Silber auf den Tellern zurück. Dieses „Tellersilber“ enthielt noch

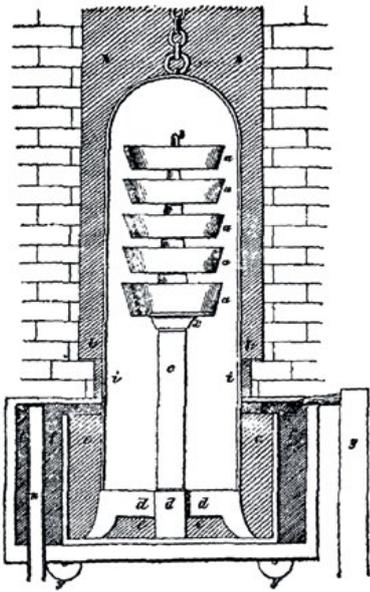


Abb. 3: Ausglühgewölbe. Gut zu erkennen sind die Amalgamteller und die im Wasserbad stehende eiserne Glocke. Aufgrund der extremen Temperaturunterschiede hatten die Glocken nur eine begrenzte Haltbarkeit. Entnommen aus [6]

einen gewissen Teil Kupfer und wenige andere Beimengungen. Es wurde durch Umschmelzen in eine münzfähige Qualität überführt.

Die erste Linie des Halsbrücker Amalgamierwerks, bestehend aus vier Röstöfen, vier Mühlgängen, einem Quicksaal mit zehn Fässern, zwei Waschbottichen und einem Ausglühgewölbe, nahm am 6. April 1790 mit etwa 30 Mann Belegschaft den Versuchsbetrieb auf. Nach gut vier Wochen zog Gellert eine überwiegend positive Bilanz. Alle Maschinen und Apparate sind tauglich, nur die Waschbottiche, in denen das Amalgam von Salzen und anderen Begleitstoffen befreit wird, bedürfen größerer Nachbesserungen. Bereits im ersten Betriebsquartal kann ein stolzer Gewinn von 3932 Talern ausgewiesen werden [1e]. Die Stunde der Wahrheit schlägt aber erst am 7. Januar 1791. An diesem Tag stellt der Oberhüttenverwalter den Brennstoffverbrauch des ersten Produktionszeitraums zusammen. Ist die Einsparung wirklich nennenswert? Befriedigt kann sich Gellert zurücklehnen. Bezogen auf die Mark ausgebrachtes Silber, wurde nur ein halber Korb Holzkohle verbraucht. Für den Schmelzprozess ist fast das Dreifache vonnöten.

Die vielversprechenden Ergebnisse des Probetriebs rechtfertigten den weiteren Ausbau der Verarbeitungskapazität des Amalgamierwerks. Bereits im Juli 1792 ging eine zweite Produkti-

onslinie in Betrieb. Die Arbeitsplätze waren sehr begehrt; immerhin waren die Tätigkeiten leichter und weniger gesundheitsschädlich als in den Schmelzhütten. Die Amalgamierwerker waren jung und motiviert, nur wenige hatten bereits ihr 25. Lebensjahr überschritten. Auf Beschluss des Oberbergamts wird ihnen eine eigene Arbeits- und Paradekleidung zubilligt. Das Werk wurde auch nicht in die Halsbrücker Hütte eingegliedert, sondern erhielt eine separate Administration, die direkt dem Oberhüttenamt unterstand.

Der Bau des Halsbrücker Amalgamierwerks ist ein frühes Beispiel dafür, wie ein innovatives Verfahren auf der Grundlage systematischer Forschungen in die Praxis umgesetzt wurde. Der Weg von der Idee über Untersuchungen im Labor- und halbtechnischen Maßstab bis hin zur fertigen Anlage ist auch heute kein anderer. Der Wissenstransfer zwischen v. Born, Gellert und v. Charpentier war mustergültig und ermöglichte die zügige Auffindung der günstigsten Technologie zum Nutzen aller. Tragisch war, dass das neue Werk kurz nach seiner Fertigstellung am 17. August 1792 fast vollständig niederbrannte. Von dem Unglück, dessen Ursache nie ganz geklärt werden konnte, war auch ein großer Teil der Halsbrücker Schmelzhütte betroffen.

Da sich der Nutzen des Amalgamierbetriebs zweifelsfrei erwiesen hatte, stand der zügige Wiederaufbau des Werkes außer Frage. Nach etwas mehr als zwei Jahren ging es erneut in Betrieb [1f]. Neben der Verbesserung der Arbeitsbedingungen wurde besonderer Wert auf die Brandsicherheit gelegt. Die bedeutendste Neuerung war dabei die Errichtung eines Druckwerks auf dem Amalgamierhof. Angetrieben von einem überschlägigen Wasserrad, konnte die in einem Turm untergebrachte Anlage mit vier Zylinderpumpen 2.400 Liter Löschwasser pro Minute bei einem Druck von 6 bar bereitstellen. Die Löschwasserentnahmestellen wurden über das gesamte Werk verteilt. Selbst nach dem Ende des Amalgamierbetriebs diente der Turm noch längere Zeit zur Erzeugung von Druckluft.

Das 1794 wiedereröffnete Amalgamierwerk war in der Folgezeit nicht nur von großer wirtschaftlicher Bedeutung, zeitweise wurden hier bis zu zwei Drittel der Freiburger Erze verarbeitet, sondern es erlangte eine Popularität,

die bisher kein anderer Hüttenbetrieb für sich verbuchen konnte. Die Anlage überzeugte durch ihre geistreiche und elegante Ausführung, die moderne und klare Architektur der Gebäude und technischen Raffinessen, wie das erwähnte Druckwasserwerk. Der nach dem Brand entstandene große Anquicksaal mit nunmehr 20 rotierenden Fässern muss zweifellos einen beeindruckenden Anblick geboten haben. Professor Lampadius, Schüler und Nachfolger auf dem Lehrstuhl Gellerts, wählte 1816 das Amalgamierwerk für den Einbau seiner „Thermolampen“ aus. Es war damit das erste Gebäude auf dem europäischen Kontinent, das vollständig mit Gas illuminiert wurde. Zu dieser Zeit wurde auch die sicherlich nicht ganz abwegige Bezeichnung „8. Weltwunder“ geprägt. Jedenfalls finden sich in den gut gefüllten Gästebüchern des Werkes viele bekannte Namen, wie Goethe, Humboldt, Schopenhauer, Kleist, Hardenberg u. a.

Eine Eigenart des Amalgamierverfahrens war seine Vollkommenheit; es konnte nicht wesentlich weiterentwickelt werden. Anders war die Situation bei den Schmelzprozessen. Hier wurden in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts u. a. durch die Einführung von Flammöfen nach englischem Vorbild enorme Fortschritte erzielt. Die Brennholzersparnis, bisher ein Hauptargument für die Amalgamation, wurde mit der durchgängigen Anwendung reichlich vorhandener fossiler Brennstoffe irrelevant. Das Ausbringen war nun vollständiger und das gewonnene Silber war reiner als das aus dem Amalgamierwerk. Es wurde sogar in Betracht gezogen, die Quickkrückstände nochmals zu verschmelzen [1g].

In der Mitte des 19. Jahrhunderts ging das Ausbringen der dünnen Erze im Vergleich zu den bleireichen Glanzerzen, die aber zur Amalgamation nicht geeignet waren, stetig zurück. In Verbindung mit der Errichtung einer neuen Flammofenhütte wird das Amalgamierwerk in der zweiten Hälfte des Jahres 1857 interimweise stillgelegt. Schließlich beantragt das Oberhüttenamt am 9. Januar 1858 die endgültige Einstellung des Amalgamierbetriebs. Die bisher eigenständige Administration des Werkes wird – wie auch die Gebäude und Anlagen – der Halsbrücker Hütte übertragen. Während der Verkauf der noch vorhandenen 168 Zentner Quecksilber relativ zügig vonstatten geht – beispielsweise erhält auch das neu eingerichtete Hüttenlabo-



Abb. 4: Vom Ensemble des Amalgamierwerks blieb das nördliche Hauptgebäude, das die hüttentechnischen Einrichtungen beherbergt, erhalten. Gut erkennbar ist die Konstruktion der beiden Dachgeschosse mit der charakteristischen doppelten Gaupenreihe. Die gleichmäßige Aufteilung der Geschosse und Anordnung der Fenster war beispielgebend für die Industriearchitektur des 19. Jahrhunderts. Das einzigartige Zeugnis der Industriegeschichte soll zusammen mit den Relikten des Löschwasseraquädukts im Rahmen des Projekts „Montanregion Erzgebirge“ in die Welterbeliste der UNESCO aufgenommen werden.

ratorium unter der Leitung von Ferdinand Reich (1799–1882) 50 Pfund – tut sich die Hütte mit anderen Materialien und Einrichtungsgegenständen schwer. So werden erst 1869 Ausglühteller u. ä. nicht anderweitig einsetzbare Gerätschaften verschrottet. Ein Gebäude, Gebäudereste und Teile des Aquädukts des Druckwasserwerks sind bis heute erhalten geblieben. Sie sind einzigartige Zeugen wegweisender Industriebaukunst und stehen für beeindruckende Leistungen von Wissenschaftlern wie Christlieb Ehregott Gellert, Johann Friedrich Wilhelm v. Charpentier und August Wilhelm Lampadius.

Gellerts Vermächtnis

Am 18. Mai 1795, 4 Uhr morgens verstirbt Christlieb Ehregott Gellert „an Schwäche des Alters und Entkräftung“, wie es in einem Aktenvermerk des Oberhüttenamts heißt [1h]. Für das Begräbnis am 22. Mai ordnet das Oberbergamt einen Leichenzug vom Petriplatz zum Donatskirchhof an, der bestenfalls mit der nächtlichen Bestattungszeremonie des Oberberghauptmanns von Herder im Jahre 1838 verglichen werden kann. Etwa 400 Berg- und Hüttenmänner sowie alle hochrangigen Vertreter der Bergbehörden nahmen an der Zeremonie teil [1i]. Der prächtige Sarg, getragen von 24 Ältesten, wurde von Amalgamierarbeitern und Bergakademisten begleitet – sicherlich ein Sinnbild für die Verdienste, die der Verstorbene sich bei der Einführung der Amalgamation und der akademischen Ausbildung erworben hatte.

Nach der Beisetzung Gellerts ergaben sich vielfältige personelle Veränderungen im Oberhüttenamt, an der Bergakademie und im Amalgamierwerk. Die Oberhüttenverwalterstelle wird mit August Friedrich Schulze neu besetzt; die Oberaufsicht über den Amalgamierbetrieb muss sich der neue Chef der Behörde allerdings mit Bergrat v. Charpentier, der nun am Oberhüttenamt angestellt wird, teilen. Die vielen nachgeordneten Beamtenstellen, die größtenteils alle mit einer Gewinnbeteiligung am Amalgamierwerk verbunden waren, werden neu verteilt. Auch Professor Lampadius, der nun Gellerts Lehrstuhl an der Bergakademie innehat, wird beim Oberhüttenamt angestellt. Insgesamt kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, dass Gellerts Fußstapfen viel zu groß für ei-

nen Nachfolger allein waren. Christlieb Ehregott Gellert war nicht nur einer der bedeutendsten Metallurgen seiner Zeit. Wenn man Wissenschaftler, die sich in einer Vielzahl von Fachgebieten heimisch fühlen, als Universalgelehrte bezeichnen will, so trifft dies ohne Frage auf ihn zu. Seine praktischen Fähigkeiten im Bereich Chemie, Metallurgie, Mineralogie und Maschinenbau waren ebenso entwickelt wie seine theoretischen Kenntnisse. Nach seinen *Anfangsgründen zur metallurgischen Chymie* gab es kein Lehrbuch mehr, das alle drei Fachgebiete miteinander vereinte. Noch 1998 folgte eine Neuauflage der englischen Ausgabe. Die junge Bergakademie verdankt einen wesentlichen Teil ihres guten Rufs in punkto Ausbildung von Berg- und Hüttenbeamten Gellerts theoretisch-praktischen Unterricht. Mit seinem Tod fand eine Ära ihr Ende. Dem Leser sollten nun genügend Fakten zur Kenntnis gelangt sein, um entscheiden zu können, ob es Christlieb Ehregott Gellert verdient, aus dem Schatten seines Bruders hervorzutreten.

Literatur

- 1 Akten im Bergarchiv Freiberg, 1a: 40174, 265; 1b: 40035, 375; 1c: 40035, 526 ; 1d: 40035, 527; 1e: 40035, 528; 1f: 40035, 532; 1g: 40035, 545; 1h: 40035, 14; 1i: 40010, 725
- 2 Gellert, C. E. Anfangsgründe zur metallurgischen Chymie, Leipzig 1776
- 3 Archiv der TU Bergakademie Freiberg, OBA 254, Bl. 121–125
- 4 Lauterbach, W., Bergrat Christlieb Ehregott Gellert, Freiburger Forschungshefte, D 200, 1994
- 5 Born, I. v., Ueber das Anquicken der Gold- und silberhaltigen Erze, Rohsteine, Schwarzkupfer und Hüttenpeise, Wien 1786
- 6 Winkler, K. A., Die europäische Amalgamation der Silbererze und silberhaltigen Hüttenprodukte, Freiberg 1848



Abb. 5: Ausschnitt aus der Planskizze des Oberbergamts für den Leichenzug von Christlieb Ehregott Gellert am 22. Mai 1795. Vorlage und Repro: Sächs. Staatsarchiv, Bergarchiv Freiberg, 40010, Nr. 725

Zum 50. Todestag von Rektor Professor Dr. Günther Hollweg

Am 7. Juni 1963 verstarb Prof. Dr. Günther Hollweg, seit 1956 Professor mit Lehrstuhl für Organisation des Bergbaubetriebs und seit 1961 Rektor der Bergakademie Freiberg. Erst zwei Tage zuvor war Hollweg im Rahmen der Eröffnung des Berg- und Hüttenmännischen Tages feierlich als Rektor in seine zweite Amtszeit eingeführt worden. Die ihm gewidmeten Nachrufe, ebenso der Bericht über die ihm zu Ehren abgehaltene Trauerfeier am 13. Juni 1963 im Hörsaal des Instituts für Gesellschaftswissenschaften lassen von der Dramatik der Geschehnisse um seinen Tod nichts ahnen. [1]

Günther Max Ludwig Hollweg wurde am 24. Mai 1902 in Hütte, Kreis Flatow (Westpreußen), geboren. Nach einem Studium an der Bergakademie Clausthal, das er 1925 als Diplom-Bergingenieur abschloss, promovierte er 1928 an der TH Berlin-Charlottenburg zum Dr.-Ing., wobei er zugleich eine erste berufliche Station als Betriebsleiter im Flussspatbergbau der Gewerkschaft Hochscheidt in Schwarzenfeld (Oberpfalz) innehatte. Von 1928–1929 wiederum als Betriebsleiter im Flussspatbergbau bei der Firma Th. Burger, Nürnberg-Mögeldorf, in deren Betrieb in Sulzbach an der Donau tätig, wechselte er als Direktionsassistent zur Braunkohlengrube und Brikettfabrik Gebrüder Fielitz in Klettwitz (1929 bis 1936). Von 1936 bis 1945 war er Betriebsdirektor und Technischer Berater der Beutensitzer Kohlenwerke GmbH, Berlin bzw. Wildgrube, 1945 bis 1947 Technischer Leiter im Tagebau und der Brikettfabrik der Gewerkschaft Leonhardt, Neumark. Von 1947 bis 1948 Technischer Leiter im Direktorium der Kohlenindustrie Sachsen-Anhalt, Revier Merseburg, avancierte er für die Zeit von 1948 bis 1949 zum Referenten für Tagebaue in der Braunkohlenverwaltung Merseburg. Nach seinem Wechsel zur Braunkohlenverwaltung Senftenberg wurde er in der VVB Senftenberg Technischer Leiter, worauf er 1953 als Kommissarischer Technischer Leiter zur Hauptverwaltung Kohle nach Berlin wechselte. Im gleichen Jahr trat er in der Revierleitung Halle in die Position des Technischen Leiters ein, um schließlich 1956 einem Ruf zum Professor mit Lehrstuhl für Organisation des Bergbaubetriebs an die neu gegrün-



dete Fakultät für Ingenieurökonomie der Bergakademie Folge zu leisten. Nach zwei Amtsperioden als Dekan von 1957 bis 1959 und 1959 bis 1961 übte er das Amt des Rektors von seiner Investitur an – am 1. November 1961 – bis zu seinem Schlaganfall am 5. Juni 1963 aus, an dessen Folgen er zwei Tage später verstarb.

Parallel zu seinem beruflichen Werdegang war Hollweg vom 1. Mai 1933 bis 1945 Mitglied der NSDAP sowie von 1935 bis 1945 der Deutschen Arbeitsfront und in der Nationalsozialistischen Volkswohlfahrt. Ab August 1945 Mitglied in der CDU (Ost) und seit 1. Januar 1946 im FDGB, trat er 1950 in die Gesellschaft für Deutsch-Sowjetische Freundschaft ein, in deren Senftenberger Betriebsgruppe er als stellvertretender Vorstand wirkte. In die Volkssolidarität trat er 1955 ein. Viermal zuvor als Aktivist ausgezeichnet, erhielt er 1956 die Auszeichnung Verdienter Bergmann, 1959 den Vaterländischen Verdienstorden in Silber und 1962 die Ehrennadel in Silber der Gesellschaft für Deutsch-Sowjetische Freundschaft.

Seine Berufung an die Bergakademie war von heftigen Auseinandersetzungen überschattet, da er als Ingenieur einen wirtschaftswissenschaftlichen Lehrstuhl bekleiden sollte. Zusätzlich spielte seine NS-Vergangenheit in die Diskussion hinein. Hollweg setzte sich als Kandidat der Bergakademie durch. Insbesondere unterstützende Gutachten aus seinen früheren beruflichen Stationen in der DDR entkräfteten Bedenken des Staatssekretariats für das Hoch- und Fach-

schulwesen, vor allem eine mangelnde Vertrautheit mit den Lehren des Marxismus-Leninismus, durch den Nachweis der politischen Zuverlässigkeit im Sinne der SED. So hieß es in einer diesbezüglichen Stellungnahme des Leiters der Kaderabteilung der Revierleitung Halle vom Juli 1956: „Er (...) zählt, obwohl er ein Ingenieur der älteren Generation ist, zu den fortschrittlichen und staatsbejahenden Ingenieuren unseres Reviers. (...) Dr. Hollweg steht als Mitglied der CDU hinter der Regierung unserer Deutschen Demokratischen Republik und ist staatsbejahend. In Diskussionen vertritt er offen die Politik unserer Regierung. Zur Frage der Freundschaft mit den Nachbarvölkern, vor allem mit der Sowjetunion und den volksdemokratischen Ländern, äußert er sich positiv. In den Tagen des Putschversuches 1953 brachte er laut und unmissverständlich seine Ablehnung gegenüber diesen Machenschaften zum Ausdruck; er befuhr in diesen Tagen unsere Werke wie sonst und stand immer zur Verfügung. Zur Volksbefragung am 27., 28. und 29.6.1954 war er als CDU-Mitglied sofort bereit, das Referat in einer Belegschaftsversammlung zu übernehmen, um die Belegschaft in einem letzten Appell für die Stimmabgabe zum Friedensvertrag und gegen die EVG zu überzeugen. Seit dem September 1954 leitet Dr. Hollweg einen Zirkel der Staatspolitischen Schulung. Seine pädagogischen Eigenschaften versetzen ihn in die Lage, in sehr anschaulicher, wirtschaftspolitisch richtiger Argumentation den Stoff zu vermitteln. Seine Zirkelleiter-Tätigkeit ist keine rein schulmäßige, sondern eine Überzeugungsarbeit im fortschrittlichen Sinne unserer Arbeiter und Bauernmacht.“ [2] Nicht zuletzt dürfte diese Beurteilung seiner politischen Haltung durch einen Vertreter der „Praxis“ Hollweg auch den Weg ins Amt des Dekans und später des Rektors geebnet haben.

Was ereignete sich nun am 5. Juni 1963? Darüber gibt eine „Information“ des Mitarbeiters der Abteilung Wissenschaften des ZK der SED, Arved Kempke, Auskunft: „Nach der Eröffnung des XV. Berg- und Hüttenmännischen Tages in Freiberg, die ausgezeichnet verlaufen war und auf der auch der Rektor der Bergakademie für seine zweite Amtsperiode öffentlich in sein Amt wieder eingeführt worden war, hatte der Rektor – wie immer – zu einem Mittagessen geladen. (...) Im Verlaufe dieses Essens hat sich der Stellv. Vorsitzende des Volkswirtschaftsrats, Gen. Siebold, in außerordentlicher Weise rüpelhaft und

undiszipliniert gezeigt. In ausgesprochen unsachlicher Weise hat er im Verlaufe seiner Auslassungen sowohl den Rektor als auch im besonderen den Staatssekretär für das Hoch- und Fachschulwesen, Gen. Prof. Gießmann, angegriffen. Noch vor Beendigung des Essens hat Gen. Siebold den Raum verlassen, ohne sich zu verabschieden. (Aus Informationen ist zu entnehmen, dass er mit Gen. Lesinski in die Umgebung von Freiberg zum Baden gefahren ist.) Unmittelbar, nachdem Gen. Siebold den Raum verlassen hatte, erlitt Prof. Hollweg einen Schlaganfall, an dessen Folgen er dann verstorben ist. Auf Grund der außerordentlichen Arbeitsbelastung als Rektor, als Forscher und Hochschullehrer war die Gesundheit des Rektors natürlich angegriffen; die entstandene Erregung im Zusammenhang mit den geschilderten Vorkommnissen hat aber zweifellos als Auslöser des Schlaganfalls gewirkt. So jedenfalls ist es auch bei den anwesenden Professoren und Genossen angekommen.“ [3]

Auslöser der Auseinandersetzung waren Probleme der Energieversorgung während des strengen Winters 1962/63 und der schwelende Streit zwischen den Bergakademie-Professoren Erich Rammler, Helmut Härtig, Hans Matschak, Johannes Bahr und eben Günther Hollweg mit dem Volkswirtschaftsrat, in deren Folge Rammler den Vorsitz des Deutschen Brennstoff-Instituts aus Protest abgab. [4]

Die TU Bergakademie Freiberg ehrt Günther Hollweg heute als „Nestor der Ingenieurökonomie“ durch eine Gedenktafel am Haus Brennhausgasse 5, einem ehemaligen Sitz der Fakultät für Ingenieurökonomie.

■ Norman Pohl

Anmerkungen

- 1 „Wenige Tage danach, mitten in der Ausübung seiner Amtstätigkeit, verstarb er plötzlich.“ Galenmüller, Otto: Prof. Dr.-Ing. Günther Hollweg – 100 Jahre, in: Zeitschrift für Freunde und Förderer der Technischen Universität Bergakademie Freiberg 9. Jg. (2002), S. 64–65, hier

S. 65. „Mitten aus einem ganz von der Arbeit erfüllten Leben wurde der verdienstvolle Verstorbene aus seinem Wirkungsbereich gerissen.“ Der Senat der Bergakademie Freiberg; amtieren der Rektor Prof. Dr.-Ing. habil. [Joachim] Wran: [Traueranzeige für] Magnifizienz Prof. Dr.-Ing. Günther Hollweg, in: Die Hochschulstadt. Zeitung für die Angehörigen und Freunde der Bergakademie Freiberg 6. Jg. (1963), Nr. 17, 19. Juni 1963, S. 1. Zur Trauerfeier: Anonymus: Er bleibt uns unvergessen, ebd.

2 UA BAF I Kd 1594.

3 BArch DY 30 / IV A 2/9.04/389.

4 In seiner Autobiografie sprach Rammler zusammenfassend von „Mißhelligkeiten“. Siebold bezeichnet Rammler als Minister, eine Funktion, die dieser erst von 1965 an ausübte. Lesinski wird von Rammler als Teilnehmer an einer „ausgiebigen Aussprache“ auch erwähnt, allerdings ohne dessen Funktion zu benennen. Rammler, Erich: Mein Berufsleben. Teile I bis III. Unveränderte Abschrift persönlicher Aufzeichnungen. Freiberg 2006 (Schriften des IEC 2), S. 232–233. Siebold, Klaus, in: Herbst, Andreas; Ranke, Winfried; Winkler, Jürgen: So funktionierte die DDR. Band 3: Lexikon der Funktione. Reinbek bei Hamburg 1994, S. 317.

Wie gut kennen wir Friedrich Wilhelm von Oppel?

Elias Wegert

Die Namen der Gründerväter der Bergakademie, Friedrich Wilhelm von Oppel und Friedrich Anton von Heynitz, sind weit über die Grenzen Freibergs hinaus bekannt, und ihre Verdienste um die Schaffung und den Aufbau unserer traditionsreichen Bildungsstätte wurden bereits eingehend gewürdigt. In diesem Beitrag soll eine bisher kaum beachtete Seite einer scheinbar wohlvertrauten Freiburger Persönlichkeit in Mittelpunkt stehen.

Im Jahr 1746 erschien im Dresdner Verlag von Georg Conrad Walther ein bemerkenswertes Buch mit dem Titel *Analysis triangulorum*, in dem auf etwa 100 Seiten die Grundlagen der ebenen und sphärischen Trigonometrie entwickelt werden. Es gilt heute als das erste vollständige Lehrbuch der Trigonometrie auf analytischer Grundlage [1]. Sein Verfasser ist der damals 26-jährige Friedrich Wilhelm von Oppel.

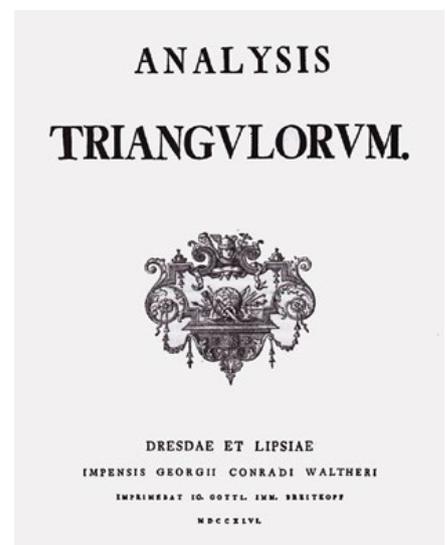
Von Oppels mathematisches Hauptwerk wird in Fachkreisen hoch geschätzt. So schreibt Andreas von Braunmühl in seiner *Geschichte der Trigonometrie* [1, S. 97–98]:

Das wichtigste Werk aber in welchem diese Bezeichnungsweise angewendet ist, ist unstreitig die „Analysis triangulorum“



Friedrich Wilhelm von Oppel (1720–1769)

von Friedrich Wilhelm von Oppel. Das Ziel, welches sich der Verfasser der Schrift setzte, aus wenigen geometrisch gewonnenen Sätzen die ganzen Formelsysteme der ebenen und sphärischen Trigonometrie durch algebraische Rechnung zu entwickeln, hat er tatsächlich erreicht und damit eine Absicht verwirklicht, die vor ihm



von keinem Autor systematisch durchgeführt worden war.

War einer der beiden Gründerväter der Freiburger Bergakademie zugleich ein Mathematiker? Die Informationen der *Neuen Deutschen Biographie* [4] geben über diese Seite seiner Persönlichkeit wenig Aufschluss.

Friedrich Wilhelm von Oppel wurde am 4. Mai 1720 als Sohn des Rittergutsbesitzers Bernhard Wilhelm von Oppel

und seiner Ehefrau Justine Christiane (geborene von Heynitz) auf dem Rittergut Krebs bei Pirna geboren. Nach einem kurzen Studium der Rechte wandte sich von Oppel dem Bergbau zu, trat 1743 als Assessor in das Oberbergamt Freiberg ein und wurde 1755 zum Berghauptmann ernannt. In seine Zeit als Bergassessor fällt sehr wahrscheinlich auch die Arbeit an der *Analysis triangulorum*, und tatsächlich gibt Oppel im Vorwort des Buches *Freibergae Saxonum* als Entstehungsort an.

Wie ist es möglich, dass ein junger Bergamtsassessor das seinerzeit beste Lehrbuch zur Trigonometrie schrieb? Bei Werner Lauterbach [3, S. 26] lesen wir, dass der junge Oppel im Alter von 20 Jahren auf eigene Kosten Privatunterricht in Mathematik und in naturwissenschaftlichen Fächern bei Bergrat Johann Friedrich Henckel nahm. Es spricht für die Qualität dieser Ausbildung und eine außergewöhnliche mathematische Begabung Oppels, dass er durch diesen Unterricht befähigt wurde, ein solche Aufgabe in Angriff zu nehmen und erfolgreich zu bewältigen.

Noch weniger wissen wir darüber, was Oppel bewogen haben mag, dieses mathematische Thema systematisch zu entwickeln und in Buchform zu publizieren. Wurde Oppel vielleicht durch seine 1740 begonnene Ausbildung bei Markscheider August Beyer (vgl. Wagenbreth u. a. [11]) und die sich anschließende praktische Tätigkeit veranlasst, sich intensiver mit Problemen der Trigonometrie auseinanderzusetzen – oder war es nur eine Liebhaberei? Das Vorwort des Buches gibt leider keine Auskunft über die Entstehungsgeschichte, und sekundäre Quellen scheinen in den Freiburger Archiven nicht vorhanden zu sein¹, sodass Oppels Motive für uns weitgehend im Dunkeln bleiben. Natürlich drängt sich die Frage auf, warum Oppels Arbeiten heute scheinbar nur in Fachkreisen bekannt sind. Da *Analysis triangulorum* in lateinischer Sprache verfasst wurde, dürfte sie bereits zu Oppels Zeiten nur einem eingeschränkten Leserkreis zugänglich gewesen sein. Die Lesbarkeit wird außerdem durch schwerfällige Bezeichnungen und eine relativ abstrakte Darstellung nicht eben erleichtert.

Das Erscheinen von Abraham Gotthelf Kästners Werk *Anfangsgründe der Arithmetik, Geometrie, ebenen und sphärischen Trigonometrie und Perspectiv* [2] im Jahr 1759, das bald zum Standardwerk wurde und weite Verbreitung fand, dürfte von Oppels Lehrbuch weiter in den Hintergrund gedrängt haben. Dass es dennoch als wichtiges Dokument und Kulturgut geschätzt wird, zeigt unter anderem auch das Erscheinen von Nachdrucken bis in die Gegenwart.

Es gibt jedoch tatsächlich zwei Formeln, in denen Oppels Name überdauert hat und seine Bedeutung als Mathematiker dokumentiert ist. Sie finden sich in verbaler Formulierung auf Seite 18 der *Analysis triangulorum*: *Die Basis des Dreiecks verhält sich zur Summe (Differenz) der Schenkel wie der Kosinus (Sinus) der halben Summe der Basiswinkel zum Kosinus (Sinus) der halben Differenz derselben*. In heute geläufiger Formelsprache lauten diese Relationen zwischen den Seiten a , b , c und den gegenüberliegenden Winkeln α , β , γ eines Dreiecks

$$\frac{a+b}{c} = \frac{\cos \frac{\alpha-\beta}{2}}{\cos \frac{\alpha+\beta}{2}}, \quad \frac{a-b}{c} = \frac{\sin \frac{\alpha-\beta}{2}}{\sin \frac{\alpha+\beta}{2}}. \quad (1)$$

1 Nach Auskunft von Joseph Matzerath lagern im Stadtarchiv Leipzig mehr als sechs laufende Meter Akten mit Material zur Geschichte der Familie von Oppel, die unter diesem Aspekt ungesichtet zu sein scheinen.

Die erste der beiden Formeln wurde schon 1707 in Newtons *Arithmetica universalis* publiziert; beide gemeinsam findet man aber erstmals bei von Oppel. Heute werden beide Relationen meist nach dem Astronomen Karl Mollweide benannt, der von 1812 bis 1825 auch Professor der Mathematik an der Universität Leipzig war, und dem ihre Verbreitung maßgeblich zu verdanken ist. Die Formeln (1) wurden mehrfach (wieder-) entdeckt, unter anderen von Mauduit 1765, Simpson 1765, Mollweide 1808 und Gauß.²

In der *Analysis triangulorum* nehmen komplizierte Dreiecksberechnungen einen breiten Raum ein. Dies ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass Oppel durch derartige Berechnungen zu einer umfassenden Darstellung des gesamten Themenkreises angeregt wurde. Neben ihrer Nützlichkeit sind die hohe ästhetische Qualität und die Systematik seiner Formeln bemerkenswert.

Braunmühl [1] hat Oppels Ergebnisse sorgfältig analysiert und stellt fest: *Oppels Behandlungsweise, wie eine Menge seiner Resultate sind entschieden originell zu nennen, und er hätte sicher Nachahmer gefunden, wenn nicht in des großen Eulers Arbeiten, auch hier, wie so oft, das Bessere der Feind des Guten gewesen wäre*. Braunmühl bemerkt weiter: *Völlig neu und originell ist auch die Begründung seiner im zweiten Abschnitte behandelten sphärischen Trigonometrie; er leitet nämlich die Fundamentalsätze aus dem Netze des zum Kugeldreieck gehörenden Dreikants ab*.

Auch stilistisch ist von Oppels Jugendwerk durchaus bemerkenswert. Besonders im Vergleich zu anderen zeitgenössischen Schriften wirkt die Einleitung geradezu unkonventionell. Beispielsweise widmet Kästner sein Buch [2] dem *hochgebohrnen Freyherrn Herrn Gerlach Adolph von Münchhausen* und beendet die zweiseitige Widmung mit den Worten: *Unter den eifrigsten Wünschen für Ew. Excellenz hohes Wohlergehen verharre mit tiefster Ehrfurcht, Hochgebohrner Freyherr, Gnädigster Herr, Ew. Hochfreyherrl. Excellenz unterthäniggehorsamster Abraham Gotthelf Kästner*.

Wie erfrischend liest sich dagegen von Oppels Vorwort, der sein Werk dem geneigten Leser (*Lector Benevole*) übereignet und sich mit dem kollegialen Gruß *Vale et fave* (Lebwohl und sei wohlgesonnen) verabschiedet.

Von Oppels zweites Buch, die Anleitung zur Markscheidkunst [7], wird zu Recht als sein bedeutendstes Werk angesehen. Bereits im Vorwort macht Oppel klar, welche außerordentliche Bedeutung er der Mathematik beimisst. So schreibt er in §11: *Da die Markscheidkunst eine Wissenschaft der Größe und Lage ist, so hat solche mit allen besonderen Arten der Meßkunst dieses gemein, daß ihre Regeln aus mathematischen Gründen hergeleitet werden müssen, und nennt Mathematik und Naturlehre ... die Tragstempel, auf welchen der ganze Schrot aller bergmännischen Wissenschaften ruht*.

Erstaunlich ist dann aber doch, mit welcher Konsequenz Oppel dieses Paradigma umsetzt. Zu Beginn wird dem Leser reine Mathematik in abstrakter Darstellung (teilweise sogar in der klassischen Abfolge von Definition, Satz, Beweis) geboten. Nach und nach werden dann mehr konkrete Bezüge und Anwendungen eingeflochten, aber erst nachdem 150 Seiten Theorie bewältigt sind, wendet sich Oppel den praktischen Fragen des Markscheidwesens zu.

2 Mitunter werden sie auch schon Thomas Fincke (1561–1656) zugeschrieben, der aber lediglich Formeln angibt, aus denen sich die Oppel-Mollweideschen Beziehungen ableiten lassen [10].

Anleitung
zur
Markscheidkunst
nach ihren
Anfangsgründen und Ausübungen
flüchtig entworfen.

Die
**Abtheilung
der Gehölze**
in jährliche Gehaue.
Eine Rechnungsaufgabe.

Das dreibändige Werk von nahezu 700 Seiten Umfang enthält auch über 100 Seiten mit siebenstelligen Wertetabellen von trigonometrischen Funktionen und Logarithmen. Auch hier bleibt offen, wie diese Tafeln zustande kamen. Welche Quellen hat Ooppel verwendet – oder hat er die Funktionen sogar selbst berechnet?

Das Anliegen von v. Ooppels drittem und zugleich letztem zu seinen Lebzeiten 1760 erschienenen Buch erschließt sich aus dem Titel *Die Abtheilung der Gehölze in jährliche Gehaue* nur schwer. Erst der Untertitel *Eine Rechnungsaufgabe* lässt ahnen, dass es möglicherweise wieder um Mathematik geht – und tatsächlich haben wir hier eines der ersten Bücher zur mathematischen Optimierung vor uns. Doch lassen wir Ooppel selbst beschreiben, wovon es handelt: *Ein Forst, von dem jährlich ein bestimmter Theil oder Gehau durch Holzschlag abgetrieben, und dessen Waldbestand solchergestalt, in einer gewisser Anzahl Jahre, abgeholzet werden soll, kann, in dieser Absicht, auf verschiedene Art abgetheilt werden. ... Und in diesem Falle kommt die gar erhebliche Frage vor: Welche Menge Holzes, die am füglichsten in einer Anzahl Scheitklaftern von bestimmter Ausmessung angegeben wird, kann jährlich gefällt werden, damit ein gegenwärtig vorgefundener Waldbestand eines Forstes, nebst dem noch zu erwartenden Nachwuchse des jedesmal stehenbleibenden Theils desselben, auf eine gegebene Anzahl Jahre zureiche?*

Dieses Buch ist ein Musterbeispiel angewandter Mathematik und enthält im Kern alle Schritte zur Lösung eines praktischen Problems mit mathematischen Methoden. Ausgehend von einer



Holznutzung in unseren Wäldern heute

Beschreibung des Sachverhalts erfolgt zunächst die Bildung eines mathematischen Modells, das im Anschluss untersucht wird. Um dem Leser von Ooppels Stil nahezubringen, zitieren wir eine Passage aus § 48: *Ist jemand gesonnen einen Forst anzukaufen, die darzu anzulegende Kaufsumme Σ , mit den davon zu rechnenden jährlichen Zinsen, zu 100: ξ pro Cent zu nützen, und der zu erkaufende Forst wäre von der Beschaffenheit, daß seine wirthschaftliche Benutzung erforderte, ihn h Jahre hindurch zu schonen, hierauf selbigen mit $n+1$ jährlich erfolgenden Holzschlägen in n Jahren gänzlich abzutreiben, ihn hierauf wieder w Jahre hindurch unbenutzt zu lassen, sodann wiederum mit $n+1$ jährlichen Holzschlägen abzuholzen, nochmals w Jahre zu schonen, und mit solcher abwechselnden Beholzung und Schonung also immerwährend fortzufahren, daß der Geldnutzungsbetrag eines jeden dieser künftig erfolgenden Holzschläge = g gerechnet werden kann; so ist, wenn*

$$\text{Log } O = (n+w) [\text{Log } (\xi+1) - \text{Log } \xi],$$

woran sich weitere Formeln anschließen. Die umfangreichen Berechnungen unter Verwendung von Logarithmen und geometrischen Reihen sind (in ihrer Zeit gesehen) durchaus anspruchsvoll. Ooppel wertet seine Resultate numerisch aus, fasst die Ergebnisse in Tabellen zusammen, diskutiert ihre Konsequenzen und gibt Empfehlungen für die nachhaltige Waldbewirtschaftung unter ökonomischen Gesichtspunkten.

In moderner Terminologie ausgedrückt, behandelt *Die Abtheilung der Gehölze* eine Aufgabe der Optimalsteu-

erung. Von Ooppels Prinzip der Verbindung von Nachhaltigkeit mit Wirtschaftlichkeit, gekoppelt mit dem Einsatz mathematischer Methoden zur Lösung dieses Problems, ist heute wieder hochaktuell.

Wenn wir Friedrich Wilhelm von Ooppel als Mitbegründer der Bergakademie, Oberberghauptmann und Markscheider ehren, sollten seine Leistungen als Mathematiker und Pionier der Nachhaltigkeit dabei nicht vergessen werden.

Literatur

- 1 Andreas von Braunmühl: Vorlesungen über Geschichte der Trigonometrie, Band 2. Teubner, Leipzig 1900.
- 2 Abraham Gotthelf Kästner: Anfangsgründe der Arithmetik, Geometrie, ebenen und sphärischen Trigonometrie und Perspectiv. Verlag Vandenhoeck, Göttingen 1758.
- 3 Werner Lauterbach: Freiberg. Gedenktafeln bewahren Erinnerungen. Sutton Verlag Erfurt 2007.
- 4 Joseph Matzerath: Friedrich Wilhelm von Ooppel. In: Neue Deutsche Biographie 19 (1998), S. 557.
- 5 Joseph Matzerath: private Mitteilung 2012.
- 6 Friedericus Guilielmus de Ooppel: Analysis triangulorum. Verlag von Georg Conrad Walther, Dresden und Leipzig 1746. (Reprint: Kessinger Legacy Reprints 2012, Kessinger Publishing LLC, Whitefish, USA).
- 7 Friedrich Wilhelm von Ooppel: Anleitung zur Markscheidkunst nach ihren Anfangsgründen und Ausübungen kürztlich entworfen. Verlag von Georg Conrad Walther, Dresden 1749.
- 8 Friedrich Wilhelm von Ooppel: Die Abtheilung der Gehölze in jährliche Gehaue. Eine Rechnungsaufgabe. Dresden 1760.
- 9 Friedrich Wilhelm von Ooppel und Johann Gottlieb Kern: Bericht vom Bergbau, Leipzig 1769.
- 10 Jürgen Schönbeck: Thomas Fincke und die Geometria rotundi. NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine (2004) 80–99.
- 11 Otfried Wagenbreth, Norman Pohl, Herbert Kaden, Roland Volkmer: Die Technische Universität Bergakademie Freiberg und ihre Geschichte 1765–2008. TU Bergakademie Freiberg 2008.

CAROLIN BUTLER-MANNING

Zum 200. Geburtstag von Prof. August Theodor Scheerer

mit speziellem Blick auf sein Buch „*Akademische Bilder aus dem alten Freiberg*“

August Theodor Scheerer gehörte zu jenen Professoren der Bergakademie, die ihre Lehr- und Forschungstätigkeit mit literarischem Schaffen verbanden.

Zunächst ein kurzer Abriss von Scheerers Lebenslauf. Theodor Scheerer wurde am 28. August 1813 in Berlin geboren. Von 1826 bis 1829 genoss er eine Ausbildung an der dortigen Gewerbeschule. 1830 ging er an die Bergakademie Freiberg, um hier zwei Jahre lang zu studieren. 1832 kehrte er wieder nach Berlin zurück, um an der dortigen Universität sein Studium zu vollenden. Danach erhielt er ab 1833 eine Anstellung als Hüttenchemiker beim Blaufarbenwerk zu Modum in Norwegen, arbeitete sich dort zum Hüttenmeister empor und blieb insgesamt sechs Jahre in diesem Land. 1839 kehrte er an die Berliner Universität zurück, um sich wissenschaftlicher Tätigkeit und seiner Promotion in Philosophie zu widmen. Danach begab er sich für ein Jahr auf Reisen, während derer er sich 1840 auch längere Zeit in Freiberg aufhielt.

1841 wurde er von der Universität zu Christiania in Norwegen (Oslo, die heutige Hauptstadt des Landes hieß bis 1925 bekanntlich Christiania) zum Lektor für Metallurgie, metallurgische Technologie und Probierkunst berufen. Wiederum sechs Jahre lang blieb Scheerer nun in Norwegen. Dort befasste er sich mit Mineralanalysen und entdeckte eine Vielzahl von Mineralspezies wie Euxenit, Wöhlerit, Eisennickelkies u. a. Dabei avancierte er zum Begründer der Lehre vom polymeren Isomorphismus.

1847 ging er nach Freiberg. Bereits 1848 wurde er hier zum Professor für Praktische und Analytische Chemie ernannt. Seine Vorlesungen zeichneten sich durch exzellente Sachkenntnis, Klarheit, aber auch durch – wie es hieß – genialen Humor aus. In Freiberg setzte Scheerer auch seine mineralogisch-chemischen Studien fort und vollendete den 1. Band seines *Lehrbuchs der Metallurgie*. Ab 1856 hielt er zudem noch Vorlesungen über Theoretische Chemie sowie über Eisenhüttenkunde.



Theodor Scheerer (1813–1875)

Anfang der 1850er-Jahre hatte Scheerer ein Laboratorium für Mineralchemie eingerichtet, in dem vor allem Clemens Winkler gern arbeitete. Ab 1858 befasste sich Scheerer auf Veranlassung von Oberberghauptmann Freiherr von Beust mit der Genesis der Gesteine und Erzgänge, speziell im sächsischen Erzgebirge. Seine Forschungen bekamen nun einen zunehmend in geologisch-chemische Richtung tendierenden Charakter.

1862 wurde zu einem für Scheerer wichtigen Jahr. Er wurde zum Bergrat ernannt und konnte sich verstärkt seiner Publikationstätigkeit widmen, da der ihm zugeordnete Assistent Dr. Johann Friedrich Richard Clemens Rabe nunmehr die Vorlesungen über Chemische Technologie übernahm. Zwei seiner Beiträge zur *Festschrift zum 100-jährigen Jubiläum der Königl.-Sächs. Bergakademie zu Freiberg* vom 30. Juli 1866 verdienen hier Erwähnung: eine Abhandlung über *Die chemische Konstitution der Plutonite* sowie ein 49-seitiger Artikel über *Das bergmännische Studium*. Scheerer schwärmt dort überschwänglich von der Faszination des Bergmannsberufs, indem er z. B. schreibt: „*Wie wunderbar erscheint uns das Studium der unterirdischen Welt: Aus dem tauben Gestein leuchten uns hier und da die Erze des Eisens, Kupfers, Bleies, Silbers, Goldes und anderer Metalle entgegen und machen das suchende Auge des Bergmannes funkeln!*“ An solchen Stellen verspürt der Leser die starke poetische Ader, die Scheerer innewohnte. Daher wollen wir uns nun auch mit seinem literarischem Schaffen beschäftigen.

Zuvor sei zu seinem Lebenslauf noch ergänzt: Durch seine vielen mikroskopischen Untersuchungen und auch durch

seine schriftstellerische Tätigkeit bedingt, erkrankte Scheerer an einem Augenleiden, woraufhin er nach insgesamt immerhin 25-jährigem Wirken an der Bergakademie von seinem Lehramt zurücktrat. Er siedelte 1873 nach Dresden über und offenbarte sich dort noch zwei Jahre lang als ein „Meister der Geselligkeit und des feinen Humors“. Im Gefolge einer schweren Lungenentzündung starb Scheerer schließlich am 19. Juli 1875 und wurde seinem Wunsch gemäß in Freiberg beerdigt.

Richten wir nun also den Blick auf sein literarisches Schaffen. Vorausgeschickt sei, dass es an der Bergakademie immer wieder Professoren gab, die ihre Lehrtätigkeit mit literarischem Schaffen verbanden, wodurch sie zwar nicht weltberühmt wurden, aber zur internationalen Bekanntheit des Namens ihrer Wirkungsstätte beitrugen. Auch Theodor Scheerer hatte sich also dem Hobby des Dichtens verschrieben. Von seinen daraus erwachsenen Werken sind unbedingt der Erwähnung wert: das Epos *Stauf*, Berlin 1838, der Gedichtband *Eine Thüringenfahrt*, Braunschweig 1861, und das 1862 als Manuskript gedruckte, in Knittelversen verfasste Büchlein *Akademische Bilder aus dem alten Freiberg*, 1866 zum hundertjährigen Jubiläum der Bergakademie in Freiberg herausgegeben.

Scheerer benutzte den Knittelvers, um mit Humor und Witz soziale und kulturelle – insbesondere studentische – Verhältnisse aufs Korn zu nehmen. Scheerer nahm sich dazu insbesondere Carl Arnold Kortum und Heinrich Schmidhuber zum Vorbild. Beide schilderten das Leben eines studentischen „Helden“ in satirisch-ironischen Versen.

Im Jahr 1799 erschien Kortums Opus unter dem Gesamttitel *Die Jobsiade* – Ein komisches Heldengedicht in drei Theilen, das den Dichter weithin bekannt machte. Wie „Job“ als Student einer Universität durch das Examen rasselte, ob seiner nur Kopfschütteln hervorruhenden Antworten, ist in der „Jobsiade“ brillant dargestellt.

Anknüpfend an Kortum nahm der Freiburger Heinrich Schmidhuber (1811–1867) das Leben eines Studenten und späteren Bergmanns, den er „Herr Plötz“ nannte, ebenfalls in Knittelversform unter die Lupe und veröffentlichte 1847 seine „Plötzsiade“. Schmidhuber war von 1822 bis 1827 Schüler des Freiburger Gymnasiums und besuchte danach vier

Jahre lang die Bergakademie. Er schmiedete wie Kortum und später Scheerer gern Verse, vor allem Knittelverse, und brachte sein humorvolles Werk *Die Plötzziade* auf Anregung Bernhard von Cottas, des damaligen Professors der Geologie an der Bergakademie, zum Druck. Dieses ist eine köstliche Satire auf die z. T. überlebten Zustände im sächsischen Erzbergbau in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Mit viel Witz schildert der Autor dort auch das Leben als Gymnasiast und Student an der Bergakademie. Vor allem wegen der sehr lustigen Beschreibung des Lebens von „Herrn Plötz“ erschien Schmidhubers Werk bis 1901 in immerhin vier Auflagen.

Doch nun zu seinem geistigen Nachfolger, Theodor Scheerer, der von ihm erheblich profitieren konnte. Scheerer schrieb 1865/66 an seinem Büchlein *Akademische Bilder aus dem alten Freiberg* und schilderte darin das Leben und Treiben der Studenten in der alten Bergstadt um 1830 in Knittelversen, die er seinen *akademischen Commilitonen aus alter Zeit mit einem herzlichen Glückauf!* widmete. Das Büchlein umfasst 18 Kapi-

tel, überschrieben mit *I. Erster Eintritt ins alte Freiberg II. Akademisten-Wohnung ... IV. Bergmann's Studien V. Das Colleg ... IX. Akademisten-Freuden ... XIII. Bergmannsleben*. Auf satirische Art befasst sich Scheerer im Kapitel II mit der Wohnsituation der Studenten in Freiberg, wobei uns etwa der folgende Vers in jene Zeit zurückversetzt:

Am Haken hingen Grubenkleid und Hammer / Und Stiefel standen zahlreich auf der Bank ... / Der Bücherschatz aufschwankendem Reale, Gebröck von Mineralien aller Art, Ingleichen Waage, Compaß und Lineale - Sie alle zeugten, dass man hochgelahrt.

Im IV. Kapitel heißt es u.a.: *In Bergmann's Studien edler Saame liegt, Aus dem der geist'gen Früchte viel erwachsen. / Daß einst in Freibergs Schooß ward groß gewiegt / Die Kunst des Bergbaus, ehrt das Volk der Sachsen!*

Hier nur noch eine Strophe aus dem XIII. Kapitel über das „Bergmannsleben“ als weiteren Beleg dafür, dass Knittelverse

– nach damaligem Geschmack – sich bestens dafür eigneten, das bergmännische Leben in Freiberg zu Anfang des 19. Jahrhunderts ins Visier zu nehmen:

Aber wie sich auch die Gäng gebahren, Ob sie Reichthum schütten oder nicht: Ist die mühevoll' Schicht verfahren, Steigt der Bergmann froh zum Tageslicht.

Eine Art Resümee sind dann des „Dichters Abschiedsworte“, deren Schlusszeilen dem Leser zu bedenken gaben:

Nicht des Reichthums und des Luxus Fülle Schafft Zufriedenheit an unserm Herd. Unter der bescheid'nen Außenhülle Wächst des geist'gen Kernes lautr' Werth. Sei's nun beim Abschied Allen zugerufen: Strebt vorwärts! Blickt auch gern zurück!

Wie also zu sehen, hat Theodor Scheerer seinem bemerkenswerten Büchlein über das akademische Leben im alten Freiberg einen krönend wirkenden Abschluss gegeben.

■ Ernst Menzel

Die Quellen für diesen Beitrag sind beim Autor zu erfragen.

Zum 175. Todestag von Siegmund August Wolfgang Freiherr von Herder

Ein Universal-Reformer des Bergbau- und Hüttenwesens im 19. Jahrhundert

Herder war ein Schüler der Bergakademie, der einst dem sächsischen Berg- und Hüttenwesen zu einem mächtigen Aufschwung – zu einer seinerzeit höchsten Blüte – und damit zu weit über die Landesgrenzen hinausreichendem Ansehen verhalf. Durch sein Wirken wurden Verbesserungen auf dem Gebiet des Maschinenbaus für den Erztransport eingeführt. Des Weiteren sind seine Verdienste auf den Gebieten der Bergbaukultur und der Festigung des bergmännischen Standesbewusstseins hervorzuheben.

Von Herder wurde am 18. August 1776 in Bückeburg geboren. Seine Paten waren u.a. Wolfgang von Goethe und Matthias Claudius. Goethe war ihm besonders zugetan. Er nahm ihn später auch oft auf Dienst- und Vergnügungsreisen mit. Dieser Umgang – namentlich Reisen in Bergbauggebiete – weckte in



S. A. W. Freiherr von Herder (1776–1838)

Herder schon frühzeitig die Liebe zur Mineralogie und zum Bergwesen. Bereits als siebenjähriger Knabe sammelte er Mineralien.

Nach dem Besuch des Gymnasiums in Weimar und einem einjährigen Aufenthalt in Neuchâtel wählte Herder 1795 – erst 19 Jahre alt – zunächst die Universität Jena und 1796 Göttingen zum Studium. 1797 kam er an die Bergakademie Freiberg und studierte dort bis 1800. Hier widmeten sich ihm besonders der Berghauptmann von Heynitz, die

Bergräte von Charpentier und von Opper. Professor Abraham Gottlob Werner wurde sein väterlicher Freund, an dem er bis zu dessen Tod mit großer Liebe hing. 1802 wurde Herder an der Universität Wittenberg mit seiner Dissertation *De jure quadraturae metallica* zum Dr. phil. promoviert. Ende 1802 und 1803 wirkte er als Bergamtsassessor, Haushaltungs- und Befahrungsprotokollant bei den Bergämtern Marienberg, Geyer, Ehrenfriedersdorf und Schneeberg. 1804 wurde er als Oberberg- und Oberhüttenamtsassessor und Bergkommissionsrat nach Freiberg berufen, wo er u. a. 1806 auch die Aufsicht über das Blaufarbenwesen übertragen bekam. 1811 erarbeitete Herder in Krakau einen Plan für Verbesserungen im polnischen Bergbauwesen. Hierfür erhob ihn der König Friedrich August III. in den Freiherrnstand.

Ab 1819 begann für Herder ein weiterer glänzender Karriereaufstieg. Er wurde 1819 unter Beilegung des Charakters eines Geheimen Finanzrats zum Viceberghauptmann ernannt, im Beisein des gesamten Berg- und Hüttenstaates verpflichtet und in sein Amt feierlich eingewiesen. 1821 erhielt er die Stelle eines wirklichen Berghauptmanns. 1826 wurde er schließlich zum Oberberg-

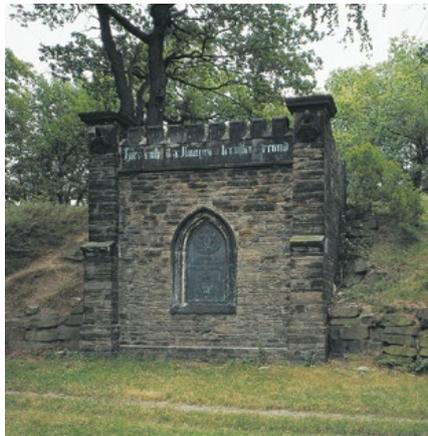
hauptmann ernannt, d. h. zum obersten Beamten des Sächsischen Berg- und Hüttenwesens.

Er ließ den zum Erliegen gekommenen Betrieb aussichtsreicher Gruben wieder aufnehmen, vermittelte neue Unterstützungen für Gruben in und um Freiberg, führte 1822 auf der Alten Mordgrube bei Brand die erste von Brendel erfundene kunstvolle Wassersäulenmaschine ein und reformierte besonders gründlich das Bergmaschinenwesen. Schon im Jahr 1825 proklamierte er seinen großen Plan, die Grubenwasserableitung des gesamten Freiburger Bergreviers durch einen gemeinsamen Stolln, den Elbstolln, zu lösen.

Im Hüttenwesen förderte er die Verminderung des kostspieligen Holzkohlenaufwands durch Verwendung von Steinkohle zum Rösten der Erze und von Koks zum Erschmelzen der Metalle, vervollkommnete die Schrotfabrikation, ermöglichte die Einführung der Gasbeleuchtung im Amalgamierwerk in Halsbrücke durch Lampadius und rief eine Maschinenbauwerkstätte ins Leben. Um die hohen Kosten für den Transport der obererzgebirgischen Erze nach Freiberg zu sparen, gründete er die Antonshütte in der Nähe von Schwarzenberg. Die Grundsteinlegung erfolgte 1828, die feierliche Inbetriebnahme 1831. In den Blaufarbenwerken wurden die Produktion von Kobaltoxiden sowie der Amalgamierprozess begonnen und auch die Nickelgewinnung verbessert.

Auch die Bergakademie verdankt Herder viel. Er führte u. a. strenge Bedingungen für die Aufnahme der Studienbewerber ein und forderte Gutachten von sämtlichen Professoren mit Vorschlägen für Verbesserungen ein, die dann vielfach auch umgesetzt worden sind. Er regelte die Bestimmungen für die auf Staatskosten Studierenden, erweiterte das Spektrum der Lehrveranstaltungen, insbesondere in Chemie und Zeichenkunst und regte wiederholt zu wissenschaftlichen Forschungen an. In diesem Zusammenhang sind die von Professor Reich und Brendel auf dem Dreibrüderschacht ausgeführten Fallversuche zur Bestimmung der Erdrotation besonders hervorzuheben.

Beginnend mit dem Jahr 1827 ließ Herder durch die Bergakademie neben einem akademischen Kalender auch einen solchen für den Sächsischen Berg- und Hüttenmann herausgeben. 1835 bereiste Herder Serbien im Auftrag der



Grabmonument „Herders Ruh“

dortigen Regierung und begutachtete das serbische Berg- und Hüttenwesen.

Neben seinem Beruf war Herder mit Leib und Seele den schönen Künsten – namentlich der Musik und Dichtkunst – zugetan und auch selbst ein Dichter zahlreicher, schwungvoller Liedertexte. Er war u. a. eng befreundet mit dem Bergsänger Moritz Wilhelm Döring, dem Dichter des Bergmannsgrußes. Auf Anregung Herders organisierten sich 1829 sämtliche Berg- und Hüttenbeamte sowie die Offizianten in einem „Bergmusikverein“, der den Bergmannsgruß zum ersten Male im Winter 1831/32 aufführte. Herder hatte, ebenso wie sein Vorgänger von Trebra, eine Vorliebe für prunkvolle Veranstaltungen und glänzende Bergaufzüge.

Im Jahr 1837 wollte Herder zur Kur in Karlsbad. Als sich keine Besserung seines Gesundheitszustands ergab, entschloss er sich zu einer Operation im Hotel „Stadt Wien“ in Dresden-Neustadt, die ihn jedoch nicht retten konnte. Am 29. Januar 1838 schloss Herder, 62 Jahre alt, seine Augen zur letzten Ruhe. Entsprechend seinem Wunsch wurde der Freund aller Knappen auf der Halde der Grube „Heilige Drei Könige“ bei Freiberg mit einer nächtlichen Bergparade beigesetzt. Eduard Heuchler gestaltete seinem Fürsprecher und Förderer zwischen 1838 und 1840 ein repräsentatives neogotisches Grabmal in Freiburger Gneis mit berg- und hüttenmännischem Figurendekor und mit der krönenden Bronzinschrift „Hier ruht der Knappen treuster Freund“. Das montanistisch bedeutende Grabmonument „Herders Ruh“ vermittelt eindrucksvoll die bergfürstliche Aura des Freiherrn von Herder. Die Straße, an der Herders Haus in Freiberg steht, trägt seinen Namen.

■ Gerd Grabow

20 Jahre SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG

Am 26. Januar dieses Jahres konnte die SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG ihr 20-jähriges Bestehen feiern und auf zwei Jahrzehnte erfolgreichen Wirkens zurückblicken: Eine Stiftung, die sich der Pflege und dem Erhalt der berg- und hüttenmännischen Traditionen und auch der berg- und hüttenmännischen Frömmigkeit widmet, um dieses Kulturgut für Freiberg und den Landkreis Mittelsachsen zu erhalten. Über 800 Jahre prägten der Erzbergbau und die Hüttenindustrie das Freiburger Land und bestimmten ein gesellschaftliches Leben, das im Alltag und bei Festlichkeiten stark von den bergmännischen Traditionen geprägt war.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren in Freiberg noch mehr als 200 Stiftungen mit unterschiedlichen Zielen aktiv. Man unterschied unter anderem Stiftungen für Armenzwecke, für Schulzwecke, für gemeinnützige und kirchliche Zwecke. Während der DDR-Zeit wurde das Wirken der Stiftungen weitestgehend eingeschränkt, und diese verloren ihre Bedeutung. Sie verschwanden aus dem öffentlichen Leben und aus den Köpfen der Menschen.

Mit der politischen und wirtschaftlichen Wende gab es auch in Freiberg wieder die Möglichkeit, Stiftungen ins Leben zu rufen. Die erste, die im Freiburger Raum eingerichtet wurde, war die SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG. Sie ist über das Stiftungsvermögen eng mit der ältesten Stiftung der Stadt Freiberg insofern verbunden, als das Stiftungsgebäude an der Chemnitzer Straße bereits 1911 als Altenheim des Stiftes St. Johannis errichtet worden ist. Diese Konstellation ermöglichte es u. a., mehr als 80 Jahre später das Verwaltungsgebäude der SAXONIA AG als Vermögenswert in die SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG einzubringen. Viele ehemalige Studenten unserer Hochschule kennen dieses Gebäude noch als Studentenquartier „Ellrodt-Heim“ der ABF.

In der Privatisierungsphase der SAXONIA AG reifte der Gedanke, das vorhandene, wertvolle Kulturgut der berg- und hüttenmännischen Traditionen langfristig zu erhalten. Neben der Übernahme des Uniformfundus der Berg- und Hüttenparade standen beispielsweise auch die Erhaltung des

ehemaligen Drusenkabinetts mit seinen ca. 300 Mineralstufen aus dem Freiburger Revier, die Erhaltung des Lagerstättenarchivs des ehemaligen Freiburger Bergbau- und Hüttenkombinats sowie die vieler für die Traditionspflege bedeutender Kulturgüter auf der Tagesordnung. Folgerichtig wurde es das satzungsmäßig verbrieft Ziel der SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG, an die jahrhundertealten Traditionen des Berg- und Hüttenwesens zu erinnern und diese mit den Mitteln der Stiftung zu erhalten, zu fördern und zu pflegen. Die materielle Basis der Stiftung, das Verwaltungsgebäude an der Chemnitzer Straße in Freiberg, sichert durch dessen Bewirtschaftung die erforderlichen finanziellen Voraussetzungen zur Erfüllung des Stiftungszwecks. Hier wird mehreren Vereinen und Institutionen für deren Traditionspflege eine Heimstatt geboten. Neben der Uniformkammer der Historischen Freiburger Berg- und Hüttenknappschaft und dem Instrumentendepot des Bergmusikkorps Saxonia Freiberg stehen weitere Räumlichkeiten für die Vereinsarbeit sowie die Knappenstube für festliche Anlässe zur Verfügung.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat die Stiftung aus den Erträgen der Bewirtschaftung des Stiftungsgebäudes für die Erfüllung des Stiftungszwecks einen Beitrag in Höhe von insgesamt 290.000 € bereitstellen können. Schwerpunkt der Förderung ist die finanzielle Unterstützung der Historischen Freiburger Berg- und Hüttenknappschaft und des Bergmusikkorps Saxonia Freiberg. Außer durch direkte Geldzuwendungen an Vereine und Institutionen erfolgt die Förderung auch mittels Sachzuwendungen und Leihgaben, u. a. an den Förderverein „Himmelfahrt Fundgrube“ (Mineralienausstellung im Besucherbergwerk „Reiche Zeche“) in Freiberg, die TU Bergakademie Freiberg (Lagerstättenarchiv) sowie durch die Bereitstellung von zinslosen Darlehen für Objekte der Sachzeugenerhaltung.

Seit 2006 ist die Stiftung Schirmherrin des Tages der Schauanlagen im Landkreis Mittelsachsen. Mit dessen jährlicher Durchführung am 1. Sonntag im Juli wurde die Tradition des ehemaligen Tags des Bergmanns neu belebt, an dem die Vereine ihre Schauanlagen für die Besucher öffnen oder Wanderungen zu verschiedenen Sachzeugen des Berg- und Hüttenwesens veranstalten.

Im Jahr 2009 wurde erstmals ein Förderpreis der SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG für publizistische Arbeiten vergeben, die den Stiftungszielen entsprechen. Der Preis wird jährlich ausgeschrieben und ist mit 1.000 € dotiert. Er soll die

Autoren für ihre ehrenamtlichen Leistungen würdigen und sie für ihre materiellen Aufwendungen entschädigen.

Der Kulturgutbestand der Stiftung wurde in den vergangenen Jahren nicht nur erhalten, sondern durch Neuerwerbungen wie beispielsweise des mechanischen Bergwerks „Dresdener Silberstolln“ als Leihgabe auf der Reichen Zeche erweitert. Das aktuelle Projekt in diesem Zusammenhang ist der Erwerb

einer 3D-Dia-Fotothek mit nahezu 4.000 Untertageaufnahmen aus den 70er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts im Altbergbau des Erzgebirges sowie von Aufnahmen aus der Schließungsphase des Uranbergbaus. Vor deren gesicherter Einlagerung im Sächsischen Bergarchiv werden noch ausgewählte Aufnahmen digitalisiert, sodass sie für die weitere Stiftungs- und Vereinsarbeit bereitgestellt werden können. Die erfolgreiche Bewirtschaftung des Stiftungsgebäudes erfordert allerdings auch Investitions- und Werterhaltungsmaßnahmen an dem über 100 Jahre alten Objekt. Seit Stiftungsgründung wurden dafür bisher 2,6 Mio. € aufgewendet. Als besonderer Schwerpunkt gilt dabei die schrittweise Fassadensanierung in mehreren Bauabschnitten seit 2009. Die bereits sanierten Fassaden der West- und der Ostseite sowie der Straßenfront setzen deutliche Zeichen im Kontext mit der generellen Stadtsanierung Freibergs. Zu erwähnen sind ebenfalls die Anstrengungen der Stiftung zur Erhaltung denkmalgeschützter

Sachzeugen am Stiftungsgebäude, wie beispielsweise einer barocken Altarbalustrade, barocker Türportale, des Torbogens am Ausgang des Stiftungsgebäudes und einer historischen Brunnenanlage. Auch im Innenbereich des Gebäudes geht eine schrittweise Instandsetzung der baulichen Substanz in Abstimmung mit den eingemieteten Institutionen und Unternehmen voran.

Seit ihrer Gründung wird die Stiftung von einem Kuratorium aus Gründungsmitgliedern und Vertretern der Freiburger Öffentlichkeit sowie von vier ehrenamtlich wirkenden Vorstandsmitgliedern und einer Geschäftsstellenleiterin geführt.

Die SAXONIA-FREIBERG-STIFTUNG schafft ideelle und materielle Voraussetzungen für den Erhalt der montanistischen Traditionen einer ganzen Region, deren Umgestaltung nach Schließung des aktiven Bergbaus und nachfolgender Reduzierung der Aktivitäten der Hüttenindustrie erforderlich wurde. Sie bewahrt die Geschichte der Menschen aus der Region in ihrem gesellschaftlichen und historischen Kontext und ist daher gleichermaßen Traditionsspeicher wie Vermittler von Innovationen, mit denen diese Tradition neu belebt wird.

■ Karl-Heinz Eulenberger, Vorstandsmitglied



Vor dem Stiftungsgebäude Vorstandsmitglied Knut Neumann, Kuratoriumsvorsitzender Bernd-Erwin Schramm und Vorstandsvorsitzender Alexander Eisenblätter



Glocke vom Davidschacht im Stiftungsgebäude



Paul Otto Rosin (1890–1967)



Erich Rammler (1901–1986)

80 Jahre RRSB-Verteilung

Dietrich Stoyan¹

Die RRSB-Verteilung

Eine der bedeutendsten wissenschaftlichen Leistungen der Freiburger Partikeltechnologie ist die Entwicklung der RRSB-Verteilung, einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die zunächst für die Beschreibung der Größe von Teilchen benutzt wurde, die durch Mahlprozesse entstanden waren. Bücher über Verfahrenstechnik behandeln diese Verteilung, und jedes bessere Nachschlagewerk über Mathematische Statistik enthält einen längeren Abschnitt darüber. Der folgende Text erzählt die schon mehrfach aufgezeichnete Geschichte um die RRSB-Verteilung – in der Meinung, einige neue Gesichtspunkte zu präsentieren.

Der junge Erich Rammler hatte das Glück, sich zu einem historisch sehr frühen Zeitpunkt dem Problem der Partikelmessung widmen zu können. Unmittelbar nach seiner Diplomprüfung 1925 bekam er nämlich eine Stelle bei Paul Rosin [1] und beschäftigte sich unter dessen Leitung mit Mahlprozessen für Kohlen. Das Ziel war die Erkundung des Zusammenhangs zwischen dem Mühlentyp und der Feinheit des Mahlguts. Rammler nutzte die ihm gegebene Chance, die Versuchsergebnisse wissenschaftlich zu verarbeiten und promovierte bereits 1927 zum Dr.-Ing. an der

Bergakademie. 1928 folgte er Rosin nach Dresden, nachdem dieser dort ein privates Ingenieurbüro gegründet hatte.

Durch zahlreiche weitere Aufträge blieb für Rosin und Rammler das Thema der Korngrößenverteilung aktuell. Rammler erkannte damals bereits, dass die Korngrößen typischerweise schiefen Verteilungen folgen, wie sie ihm und Rosin aus der Physik bekannt waren. (Solche Verteilungen sind nicht symmetrisch wie die Normalverteilung.)

Weiteres Nachdenken über Korngrößenverteilungen und intensive Analysen von Kornverteilungskurven, mit Rechenschieber und Logarithmentafel führten Rosin, Rammler, den Mathematiker Mayer sowie Karl Sperling zu der Formel für die Dichtefunktion

$$f(x) = ax^n \exp(-bx^m); x \geq 0, \quad (1)$$

wobei m und n sowie a und b positive Parameter sind. Mit Mitteln der Integralrechnung kann die Normierungskonstante a berechnet werden, während für die dringend benötigte Verteilungsfunktion $F(x)$ kein handhabbarer Ausdruck herleitbar ist. Da hatte Sperling die erlösende Idee, die Formel (1) zu vereinfachen, indem der Parameter m hinausgeworfen und durch $m - 1$ ersetzt wird. [2] Das führt auf die Formel für die Dichtefunktion

$$f(x) = bm x^{m-1} \exp(-bx^m); x \geq 0 \quad (2)$$

und nun auch für die Verteilungsfunktion

$$F(x) = 1 - \exp(-bx^m); x \geq 0, \quad (3)$$

die sehr elegant und für das Rechnen bequem sind. Das wurde 1933, also vor 80 Jahren, publiziert; man sprach seitdem von der RRS-Verteilung. Die Autoren entwickelten, dem damaligen Stand der Rechentechnik entsprechend, grafische Techniken (die heutzutage auf Computern realisiert werden) zur Bestimmung der Parameter m und b . [3]

Sie zeigten, dass auch Zement- und Keramik-Teilchen näherungsweise der RRS-Verteilung folgen. Das war von großer praktischer Bedeutung, weil man so ganze Körnerkollektive durch zwei Zahlen, eben die Parameter b und m , charakterisieren konnte. Somit wurde diese Verteilungsfunktion deutschlandweit und international angewendet. Allerdings hatte die ganze Theorie keine physikalische Grundlage; die RRS-Verteilung war eben nur ein empirisch gefundener Ansatz.

In der relativen Weltoffenheit der frühen 1930er-Jahre publizierten Rosin und Rammler 1933 auch einen Artikel in einer englischen Fachzeitschrift. Ihr Beitrag wurde damals von zwei prominenten englischen Kohleforschern kommentiert. Einer der beiden, der noch heute bekannte J. G. Bennett, beschäftigte sich eingehend mit der RRS-Verteilung und vereinfachte sie 1936 formal. Anstelle von (3) schrieb man nun

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m}; x \geq 0, \quad (4)$$

wobei x_0 das 63%-Quantil der Verteilung ist. Man sprach seitdem von der RRSB-Verteilung, nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennett. Zuvor hatten Rosin und Rammler noch im Dezember 1933 in der weit verbreiteten Zeitschrift *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering* im Rahmen einer Diskussion ihre Formel publiziert. Damit hatten sie auch nach heutigen Maßstäben genug für die Sicherung ihrer Priorität getan – möchte man meinen.

Die 1930er-Jahre waren aber keine gute Zeit. Zunächst gab es die Weltwirtschaftskrise, die Deutschland schwer traf, aber die Arbeit des Rosinschen Ingenieurbüros in Dresden nicht wesentlich beeinträchtigte. Dann jedoch kamen die Nationalsozialisten an die

¹ Institut für Stochastik, Prüferstraße 9
09599 Freiberg
Tel. +49 (0)3731 39-2118
Fax +49 (0)3731 39-3598
stoyan@math.tu-freiberg.de

Macht, und ihr Antisemitismus wurde nun Staatspolitik. Da Paul Rosin Jude war, wurde seine Arbeit behindert, und Rammler, der treu zu ihm hielt, bekam Schwierigkeiten.

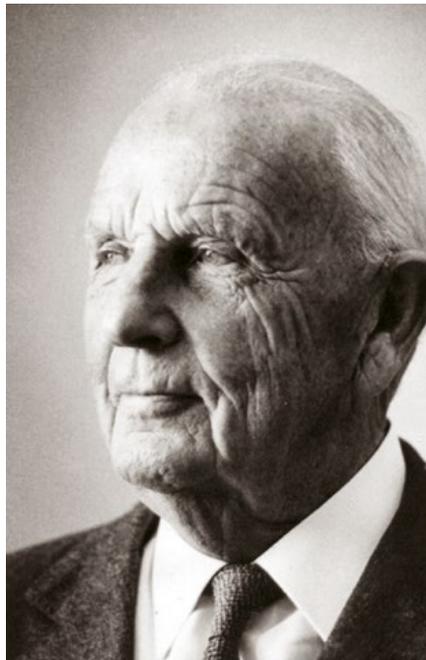
Der Druck der Nationalsozialisten wuchs immer mehr, und so verkaufte (mit Ratenzahlung und Rückkaufsrecht) Rosin sein Dresdner Ingenieurbüro mit Laboratorium in der Bautzner Straße 86 im Frühjahr 1936 an Rammler. Rosin zog sich zunächst nach Berlin zurück, wo er Honorarprofessor war. Im Frühjahr 1938, etwa ein halbes Jahr vor der Kristallnacht, emigrierte er nach England. Rammler und Rosin sahen sich 1961 wieder und hatten, nach Rammlers Worten, gute Gespräche; Rosin starb 1967.

Am 13. Februar 1945 verlor Rammler all seine Habe. Das Dresdner Haus mit dem Büro wurde bei dem furchtbaren Bombenangriff völlig zerstört; er konnte mit seiner Frau nur das nackte Leben retten und eine Aktentasche – die u. a. das Verzeichnis seiner Publikationen enthielt.

Die Weibull-Verteilung

Der in Schleswig-Holstein geborene Schwede Waloddi Weibull (1887–1979) kam 1939 im Prinzip auf dieselbe Verteilung wie sechs Jahre vor ihm Rosin, Rammler und Sperling. Er war ein aus einer Gelehrtenfamilie stammender Maschinenbau-Ingenieur, der sich für die Festigkeit von Stahl und anderen Werkstoffen interessierte. Er ging von der sog. Hazard- oder Ausfallrate aus, für die er einen ihm plausibel erscheinenden Ansatz machte, der auf die Formel (3) führt. Er zitierte niemals RRSB, obwohl in den dreißiger Jahren die oben erwähnten englischen Zeitschriften in der wichtigsten Stockholmer Bibliothek vorhanden waren. Auch Weibull hatte für den entscheidenden Teil seiner Theorie keine physikalische Begründung; er begnügte sich mit dem Argument der mathematischen Eleganz.

In den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts hatte er dann die Zeit, über die von ihm gefundene Verteilung nachzudenken, was ihn zu einem epochemachenden Artikel führte, der 1951 in der Zeitschrift der US-amerikanischen Gesellschaft der Maschinenbau-Ingenieure (ASME) erschien. Darin pries er die Verteilung anhand von sieben verschiedenen Beispielen (Festigkeit von Stahl, Größe von Asche-Partikeln, Festigkeit von Baumwollfasern, Länge von Fossili-



Ernst Hjalmar Waloddi Weibull (1887–1979)

en, Lebensdauer von Stahlproben, Größe von Männern, Breite von Bohnen) als eine allgemein nützliche Verteilung an. Dieser Artikel wurde in der Zeitschrift diskutiert. Ein amerikanischer Prof. R. A. Mugele vermerkte dabei die Existenz der Arbeiten von Rosin und Rammler, zitierte aber nur eine zweitklassige Arbeit. [4]

Die von Weibull sehr werbewirksam propagierte breite Anwendbarkeit der Verteilung und die Tatsache einer gut lesbaren englischsprachigen Publikation führten dazu, dass sich der Name „Weibull-Verteilung“ schnell verbreitete und schließlich durchsetzte – obwohl im Bereich der Partikeltechnologie noch heute viele an der Bezeichnung RRSB festhalten. Bei Google kommt man auf 2,9 Mill. Einträge für Weibull und 94.200 für Rosin-Rammler.

Die Hauptanwendungsgebiete der Weibull-Verteilung sind heute die Lebensdaueranalyse und die probabilistische Mechanik für Strukturen und Materialien, die in den 1950er- und 60er-Jahren von Freudenthal, Gumbel und Weibull entwickelt wurde. Der Wert der Weibull-Verteilung besteht vor allem darin, dass sie oft bereits bei kleinen Stichprobenumfängen zu brauchbaren Ergebnissen führt – was bedeutsam ist, da Festigkeitsversuche für Werkstoffe aufwändig sind. An der Bergakademie Freiberg wendet beispielsweise die Arbeitsgruppe von Meinhard Kuna erfolgreich die Weibull-Theorie an.

Rammler erfuhr von der 1951er-Arbeit Weibulls erst 1973 durch einen eng-

lischen Professor. (Weibulls ausgezeichnete Aufsätze von 1939, die halb-intern vom Stockholmer Königlich-Schwedischen Ingenieur-Forschungsinstitut gedruckt wurden, hat er wohl nie gesehen.) Das muss für ihn ein schwerer Schlag gewesen sein, vor allem die Tatsache, dass man die Priorität von RRSB einfach ignorierte und selbst im Zusammenhang mit Korngrößenverteilungen von der „Weibull-Verteilung“ sprach. Wie hätte er auch auf die Idee kommen sollen, das ASME Journal of Applied Mechanics zu lesen, das damals in der DDR nur die TH Dresden bezog? Und hätte er dann an der Diskussion teilnehmen können? Er äußerte sich 1976 in der DDR-Zeitschrift „Neue Bergbautechnik“ zum Thema „Weibull-Verteilung“ natürlich etwas brummig. Die Art und Weise, wie Weibull die Wahl der Form der Ausfallrate begründet hatte (*the simplest mathematical expression of the appropriate form*) befremdete ihn, weil er die Verteilung durch langwierige, harte Arbeit empirisch gefunden hatte.

Es ist für Freiberg ein nur schwacher Trost, dass es das Gesetz der Eponymie von Stephen Stigler gibt, wonach wissenschaftliche Entdeckungen oft nach demjenigen benannt werden, der sie einem breiteren Kreis bekannt macht – und nicht nach dem eigentlichen Entdecker.

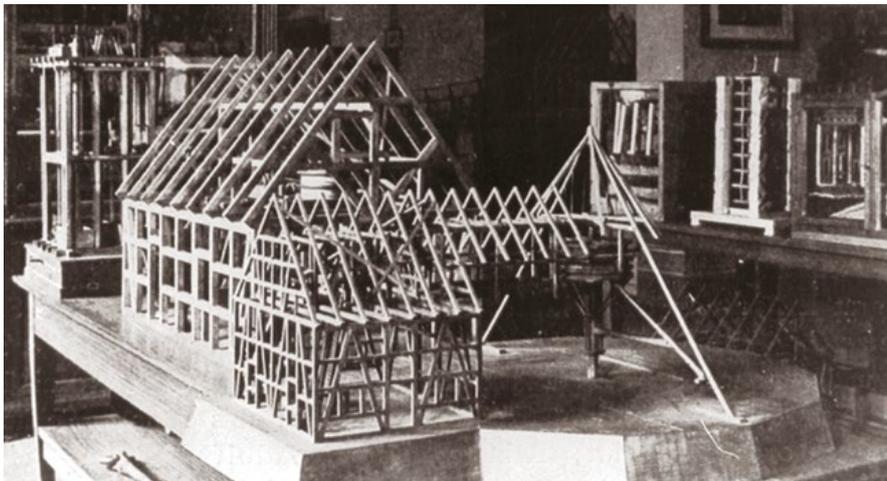
Anmerkungen

- 1 Der 1890 geborene Rosin hatte an der Bergakademie Hüttenkunde studiert, promoviert und habilitiert. Er leistete sehr erfolgreiche Ingenieurarbeit im weiten großen Feld der Brennstoff-, Feuerungs- und Kohlenverfahrenstechnik. 1925 leitete er ein staatliches Institut in Halsbrücke.
- 2 Offen ist die Frage, ob nicht der ursprüngliche, allgemeinere, drei-parametrische Ansatz mit den heutigen rechen-technischen Hilfsmitteln nützlich sein könnte.
- 3 Ein sogen. RRS-Körnrunznetz wurde bis in die DDR-Zeit hinein produziert und ist noch heute im Internet präsent.
- 4 Das war eine deutschsprachige Arbeit von Rosin und Rammler vom Ende der 1920er-Jahre. Wer weiß, was geschehen wäre, hätte Mugele die englischen Arbeiten von 1933 zitiert und darauf verwiesen, dass Weibull auch die Prioritätsrechte eines von den Nationalsozialisten aus Deutschland vertriebenen Wissenschaftlers und eines Engländers verletzte. Im Übrigen hatte der französische Mathematiker Maurice Fréchet schon 1927 die hier besprochene Verteilung im Kontext von Extremwertverteilungen betrachtet, womit damals schon eine mathematische Erklärung für das Auftreten der Verteilung gegeben wurde. Allerdings konnte kaum ein Nichtmathematiker die komplizierte Abhandlung verstehen.

Modellgeschichten

Teil 2: Ein Pferdegöpelmodell überdauert die Zeit

Frieder Jentsch¹



Modell eines sächsischen Pferdegöpels von 1799 in der bergmännischen Modellsammlung, um 1910

Göpelwerke verschiedenster Art gehören zu den ältesten technischen Einrichtungen, die dazu dienten, manuelle Tätigkeiten der Menschen zu erleichtern. Als durch Zugtiere getriebene Maschinen hatten sie ihren unverzichtbaren Platz in der technischen Entwicklung. Auch der Bergbau übernahm die aus antiken Zeiten stammende Grundkonstruktion, entwickelte sie weiter und vervollkommnete sie. Der Pferdegöpel war vor der Einführung der Dampfmaschine die wichtigste Fördermaschine in den Bergbaugebieten – ungeachtet einiger Besonderheiten in der maschinentechnischen Ausführung.

Die Bergakademie, die für ihren Lehrbetrieb stets auf eine Zusammenschau aller wichtigen technischen Lösungen aus dem sächsischen wie auch aus benachbarten Bergbaugebieten in Gestalt von Modellen oder auch als Zeichnung Wert legte, konnte immer auch auf mehrere Pferdegöpelmodelle verweisen. Der im Wissenschaftlichen Altbestand der Universität erhaltene Sammlungskatalog vom Beginn des 19. Jahrhunderts verweist unter Pkt. 35 auf das Modell eines Pferdegöpels, der im Original 1826 nicht mehr vorhanden war, ferner unter Pkt. 36 auf ein gleichartiges Modell von der Fundgrube Himmelsfürst, unter 42 auf einen schwedischen Göpel und unter 101 auf einen Pferdegöpel von der bei Brand in Förderung gewesenen Grube Schwarzfärbe.

Die Wertschätzung gegenüber sol-

chen Modellen war beachtlich. 1839 fand eine Revisionskommission auf dem Dachboden der Bergakademie ältere Modelle, die für aufhebenswert befunden wurden, darunter auch das eines Pferdegöpels der Grube Neuglück und Drei Eichen. Auswärtiges Interesse gegenüber den Freiburger Bestrebungen zeigte sich ebenfalls: 1835 bestellte beispielsweise das St. Petersburger Bergbauinstitut bei der sächsischen Regierung u. a. das Modell eines „passagenen“, also umsetzbaren Pferdegöpels, das von der Maschinenbauwerkstatt Halsbrücke gefertigt und geliefert wurde.

Wie auch immer die Sammlungsdynamik zwischen Aufnahme und Aussonderung von Modellen über die Jahrhunderte hinweg verlief: Es kann erfreulicherweise festgestellt werden, dass zwei Pferdegöpel – ein einspänniger sächsischer und ein sechsspänniger ungarischer – erhalten sind.

Als erzählenswert erweist sich die Geschichte des unter Nr. 36 des alten Katalogs geführten Modells. Der Untersteiger Christ. Gotthelf Lange hatte es nach dem originalen Vorbild von der Himmelsfürst-Fundgrube 1799 fertiggestellt. Da es in seinen technischen Details gut gearbeitet war, kaufte es die Bergakademie an. Von nun an war es etwa 130 Jahre lang Bestandteil der „Vorzeigungen“ der bergakademischen Lehrer, zunächst im Erdgeschoss in einem Raum hinter der ersten Bibliothek, seit Mitte des 19. Jahrhunderts in einem der großzügig für die bergmännische Modellsammlung

eingerrichteten Säle über dem heutigen Rektorat.

Eine an vielen Hochschulstandorten im 20. Jahrhundert zunehmend platzgreifende Tendenz, sich von überlieferten Lehrsammlungen zu trennen und sie einer musealen Nutzung zuzuführen, betraf auch die bergakademische Modellsammlung. Ein Teil des Bestands wurde 1940 dem Stadt- und Bergbaumuseum leihweise übergeben und dort präsentiert. Leider verursachte ein Schaden am Museumsdach in den 1950er-Jahren erhebliche Beschädigungen an den Modellen und zwang zum Abbau der Präsentation. Nach Kräften wurden einige Modelle wieder repariert – und mehr noch: dem seinerzeitigen musealen Empfinden angepasst. Das schmucklos, ohne jedes Beiwerk gestaltete Lehrmodell des Pferdegöpels erhielt Bedachung, Wetterfahne, Holzpferdchen und einen Geschirrführer. Solcherart Veränderungen würden heute keineswegs mehr vorgenommen werden, waren aber damals durchaus üblich, und das nicht nur in Freiberg. Die Ergänzung ist sozusagen eine Zeitmarke, die wohl heute keiner rückbauen würde.

Mit der Einrichtung des Traditionskaabinetts wurde damit begonnen, die dem Museum leihweise überlassenen Modelle wieder an die Bergakademie zurückzuholen. Mit Gründung der Kustodie an der Bergakademie 1985 wurde mit der systematischen Rekonstruktion und Restaurierung der Modellsammlung begonnen. Die „Odyssee“ des Pferdegöpelmodells nahm ihren Fortgang: zunächst aufgestellt in einer provisorisch eingerichteten, aber der Öffentlichkeit nicht vorenthaltenen Modellkammer auf dem Dachboden des bergakademischen Hauptgebäudes, zwischenzeitlich auf Ausstellungen in verschiedenen Bundesländern, als symbolisches Objekt zur Agricola-Ehrung 1994 und die Jahre danach im Foyer des bergakademischen Hauptgebäudes bis zum Umbau des Hauses. Jetzt hat es unter Sicherheitsglas im Eingangsbereich des Lehr- und Besucherbergwerks „Reiche Zeche“ seinen Platz und kann dort bewundert werden. Das Pferdegöpelmodell ist ein eindrucksvolles Beispiel für den Nutzungs- und Funktionswandel von technischen Modellen im Verlaufe der Epochen, an deren Schnittstellen immer die Gefahr ihrer Entsorgung besteht. Unser Modell hat aber zwei Jahrhunderte überdauert und ist trotz Veränderungen nach wie vor sehenswert.

¹ Dr. Frieder Jentsch, Am Rosenhag 28, 09114 Chemnitz, frieder.jentsch@t-online.de

Zur Geschichte der Röntgenografie an der TU Bergakademie

- Teil 2 -

Autorenkollektiv unter Leitung von Heinrich Oettel

Vorbemerkungen

Seit mehr als acht Jahrzehnten wird die Röntgenbeugung als eine der wichtigsten experimentellen Methoden zur Struktur- und Gefügeanalyse von Materialien aller Art an der Bergakademie gepflegt. Der Grundstein dazu wurde 1929 am damaligen Institut für Metallografie¹ gelegt. Weiterhin wurde 1941 am damaligen Institut für Materialprüfung eine Röntgenabteilung unter Leitung von Friedrich Regler eingerichtet. Aus diesen Einheiten ging 1945 das praktisch selbstständige Röntgeninstitut am Physikalischen Institut hervor, das jedoch mit dem Weggang Reglers 1947 in das neu formierte Institut für Metallkunde und Materialprüfung überführt wurde. Über diese Entwicklungen sowie über die Geschichte der Röntgenografie am genannten Institut, der Sektion Metallurgie und Werkstofftechnik sowie dem nach der Wende wieder eingerichteten Institut für Metallkunde, dem heutigen Institut für Werkstoffwissenschaft, wurde im Teil I in der ACAMONTA 2012 (Seiten 180–187) berichtet.

Mitte der fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts begann der Aufbau weiterer Röntgenlabore in mehreren Instituten bzw. Fakultäten, sodass heute neben der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie die Fakultäten Chemie und Physik, Geotechnik und Bergbau sowie Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik diese Arbeitsrichtung in beachtlichem Maße betreiben. Darüber soll im vorliegenden zweiten Teil der Geschichte der Röntgenografie an der TU Bergakademie berichtet werden.

Chemische Institute (U. Böhme, D. Freyer, K. Köhnke, H. Schmidt)

Nachdem 1953 die Chemischen Institute im neu errichteten Clemens-Winkler-Bau an der Leipziger Straße ihr Domizil gefunden hatten, wurde 1955 Prof. R. Schrader als Leiter des Instituts für Anorganische Chemie an die Bergakademie berufen. Ein Jahr später, im



Abb. 1: Hochtemperatur-Filmkamera (Eigenbau Chemie, 1959)

Herbst 1956, begann die Ausbildung von Diplom-Chemikern an der Bergakademie. Forschungsschwerpunkt wurde die Mechanochemie. Das wissenschaftliche Interesse galt dem Einfluss intensiver Mahlungen in Schwingmühlen auf das chemische Verhalten von Festkörpern, die vor allem technische Bedeutung hatten. Röntgenografisch analysiert wurden Partikelgrößen, Gitterstörungen, Phasenumwandlungen in Korrelation zu Eigenschaftsänderungen. Mit der Leitung des Röntgenlabors war Dr. G. Tetzner (Dozent für Analytische Chemie) betraut. Anfangs stand neben Eigenbauten (Hochtemperatur-Kammer, Doppelkammer nach Guinier) und kommerziell angebotenen Debye-Scherrer-Kammern auch ein Berthold-Zählrohrgoniometer der Fa. R. Seifert (Hamburg) zur Verfügung. Später kam eine Röntgenanlage vom Typ M61 mit einem Diffraktometer HZG1 dazu.

Als Beispiele für die Forschungsarbeiten zur Mechanochemie seien genannt:

- Erhöhung der phasenabhängigen Auflösungsgeschwindigkeiten, verringerte Sintertemperaturen, verbesserte Festigkeiten von Sinterprodukten (Quarz, Bauxit, Flussspat, Chromei-

senstein, Kalkstein), bearbeitet von W. Dusdorf, H. Rump, E. Thieme, B. Hoffmann, J. Kutzer, K. Hoffmann und G. Kneschke;

- Erhöhung der Aufnahmekapazität für Schwefelwasserstoff von Eisenoxiden (Gasreinigungsmassen), bearbeitet von H. Marcy, G. Tetzner, H. Grund, K. Pietzsch
- Steigerung der katalytischen Aktivität von Nickel und Cobalt: G. Tetzner, H. Grund, W. Städter
- Abbindeverhalten und Steigerung der Endfestigkeiten von Zement: H. Schumann, W. Kölling, S. Knape, H. Hennek, K. Köhnke

Nach dem Weggang G. Tetzners und der „Beurlaubung“ Prof. R. Schraders (1967) wurde 1975 Dr. Kurt Köhnke bis zu seinem Ausscheiden 2002 mit der Leitung des Pulverdiffraktometrie-Labors im Arbeitskreis von Prof. P. Brand (Physikalische Chemie bzw. ab 1992 Kristall- und Festkörperchemie) beauftragt. Ab 2002 übernahm Dr. Daniela Freyer den Betrieb der Pulverdiffraktometrie im Institut für Anorganische Chemie. Im genannten Zeitraum wurden folgende Geräte in Betrieb genommen:

- Röntgenanlage M62 mit den Diffraktometern HZG3 und HZG4 (bereits wieder außer Betrieb gesetzt)
- Philips-Vertikalgoniometer mit Siemens-Generator und Hochtemperaturkammer HTK10 (nicht mehr vorhanden)
- Diffraktometer D5000 (1996) der Fa. Siemens mit Generator, PC-Steuerung und Vorrichtung zur Diffraktometrie mit der Kapillartechnik bis 1000 °C und Kühlvorrichtung für Kapillaren (Cryo-Jet, Oxford Instruments).

2009 wurde zu diesem Diffraktometer eine Temperatur-Feuchte-Kammer (Fa. Bruker) für Untersuchungen an Salz- und Mineralphasen in feuchten Umgebungen beschafft.

Die Kapillartechnik, angewendet im Temperaturbereich von -200 bis 1000 °C, eröffnet die Möglichkeit einer röntgenografischen Untersuchung von Stoffen, die sich bei Einwirken von Luftsauerstoff und Feuchtigkeit zersetzen (thermische Zersetzung von basischen Aluminium-

¹ Seit 1934 Institut für Metallkunde, heute Institut für Werkstoffwissenschaft



Abb. 2: Röntgenlabor des Instituts für Anorganische Chemie (1963) mit Zählrohrgoniometer nach Berthold (links), Generator M60 und Strahlmessplätzen VAM17

chloriden, gebildet beim salzsauren Tonaufschluss; Salze und Salzhydrate). Röntgenografische Bestimmungen von Gitterparametern führten zu Strukturvorschlägen für Verbindungen im stofflichen System $\text{MX} \cdot \text{MgX}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (M = Alkalimetallion; Ammoniumion $\text{X} = \text{Cl}^-$, Br^- oder I^-). Auf der Basis quantitativer Phasenanalysen wurde ein kinetisches Modell für die Reaktion von Nickelsilicid mit Nickel(II)-chlorid entwickelt.

Seit Oktober 2011 verfügt das Labor über ein D8-Discover-Diffraktometer (Fa. Bruker AXS), u. a. mit Göbelspiegel, Punktkollimatoren sowie linearem und Flächendetektor, mit dem auch orts aufgelöste Phasenanalysen, Hochtemperaturuntersuchungen an Flachpräparaten und Phasenanalysen in Kapillaren durchgeführt werden können. Mit diesen vielfältigen Gerätekonfigurationen werden zahlreiche Fragestellungen in der Salz- und Mineralchemie bearbeitet.

Im Institut für Organische Chemie wurde 1996 unter Leitung von Prof. E. Weber ein Enraf-Nonius CAD-4 (Kreis-)Diffraktometer mit Graphit-Monochromator aufgebaut (Dr. W. Seichter). Dieser deutliche Qualitätssprung in der röntgenographischen Apparatechnik machte nunmehr vollständige Strukturanalysen auf der Grundlage von Einkristallmessungen möglich (vorrangig Strukturen organischer supramolekularer Verbindungen aus dem Arbeitskreis Weber).

Als Nachfolger für dieses Gerät wurde im Jahr 2003 am gleichen Institut ein Diffraktometer der Firma Bruker AXS beschafft (Bruker-Nonius X8 APEX II

CCD Area Detector). Dieses 4-Kreis-Diffraktometer in Kappa-Geometrie verfügt über einen CCD-Flächendetektor, der eine deutlich schnellere Strukturbestimmung als mit dem Enraf-Nonius CAD-Diffraktometer ermöglicht.

Im Januar 2011 wurde eine Anlage IPDS II/IPDS 2T der Firma STOE beschafft (Institut für Anorganische Chemie, Prof. Edwin Kroke). Sie nutzt einen Generator mit einer Röntgenröhre zum Betrieb zweier Messplätze, die beide über 2-Kreisdiffraktometer mit 2D-Image-Plate-Detektoren verfügen. Routinemäßig ist die Strukturbestimmung auch bei tiefen Temperaturen möglich. Alternativ können eine Hochtemperaturereinheit (bis 700 °C) oder eine Hoch-



Abb. 3: Röntgendiffraktometer D8 Discover (Fa. Bruker AXS) im Institut für Anorganische Chemie, Arbeitsgruppe Salz- und Mineralchemie (2011)

druckzelle genutzt werden. Besonders hervorzuheben ist die mit diesem Einkristalldiffraktometer gegebene Möglichkeit, auch extrem kleine Kristalle zu untersuchen, da der Image-Plate-Detektor einen vielfach höheren dynamischen Bereich als CCD-Detektoren abdeckt. Das Einkristalldiffraktometer wird für nahezu alle aktuell von der Arbeitsgruppe bearbeiteten Forschungsprojekte genutzt, um molekulare Precursoren, kristalline Siliciumverbindungen oder neue keramische Phasen eingehend strukturell zu charakterisieren. Mit ihm werden Projekte der Forschungsschwerpunkte „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch Atomares Design und Defekt-Engineering“



Abb. 4: Anlage IPDS II/IPDS 2T der Firma STOE (Institut für Anorganische Chemie 2011)

(ADDE) und des Freiburger Hochdruck-Forschungszentrums (FHP) unterstützt.

Aktuelle Arbeiten zur Einkristallstrukturanalyse im Institut für Anorganische Chemie (Prof. E. Kroke) beziehen sich z. B. auf folgende Themen:

- Aufklärung von Zwillings- und Vielingsstrukturen (Dr. Jörg Wagler)
- Dynamische Fehlordnung, Phasenübergänge und Polymorphie bei Molekülkristallen (Dr. Uwe Böhme)
- Strukturen von Heptazin-Derivaten (Dr. Anke Schwarzer)
- Strukturen von Salzen und Salzhydraten (Dr. Horst Schmidt, Arbeitsgruppe Salz- u. Mineralchemie unter Prof. W. Voigt)

Am Institut für Organische Chemie (Prof. Monika Mazik) untersucht Dr. Wilhelm Seichter nichtkovalente Wechselwirkungen bei organischen Molekülstrukturen.

Institut für Mineralogie und Lagerstättenkunde (R. Kleeberg)

Wohl Mitte der 50er-Jahre wurde im Institut für Mineralogie und Lagerstättenkunde, das unter der Leitung Prof. Friedrich Leutweins stand, von K. Doerffel ein erstes Röntgenlabor eingerichtet, das zunächst nur über Filmkammern verfügte. Bereits 1959 war ein Zählrohrgoniometer nach Berthold mit einem Seifert-Generator Isodebyeflex in Betrieb. 1962/63 konnten ein Generator M61 mit zwei Arbeitsplätzen sowie zwei Diffraktometer vom Typ HZG1 beschafft werden. Das Labor wurde nun von R. Starke geführt. Ende der 70er-Jahre wurde der Gerätepark um ein Diffraktometer HZG3 sowie zwei Generatoren vom Typ M62 erweitert.

Das Labor widmete sich von Beginn an der Phasenanalytik an Mineralen, Gesteinen sowie technischen Produkten für die geowissenschaftliche und mineralogische Forschung. Beispiele aus den 50er- und 60er-Jahren waren:

- Mineralidentifizierung an kleinsten Probenmengen mit Debye-Scherrer-Kameras;
- Bestimmung des Hübnerit/Ferberit-Koeffizienten an Wolframiten;
- Bestimmung des Strontiumgehalts in Baryten;
- quantitative Phasenanalysen, z. B. an vererzten Karbonatgesteinen und besonders an Tonen und Tongesteinen, ein auch heute noch aktuelles Thema.

Die Methodenentwicklung für eine verbesserte quantitative Phasenanalyse von tonmineralhaltigen Gesteinen wurde ein



Abb. 5: Zählrohrgoniometer nach Berthold und Isodebyeflex-Generator (Fa. Seifert) im Institut für Mineralogie (1959)

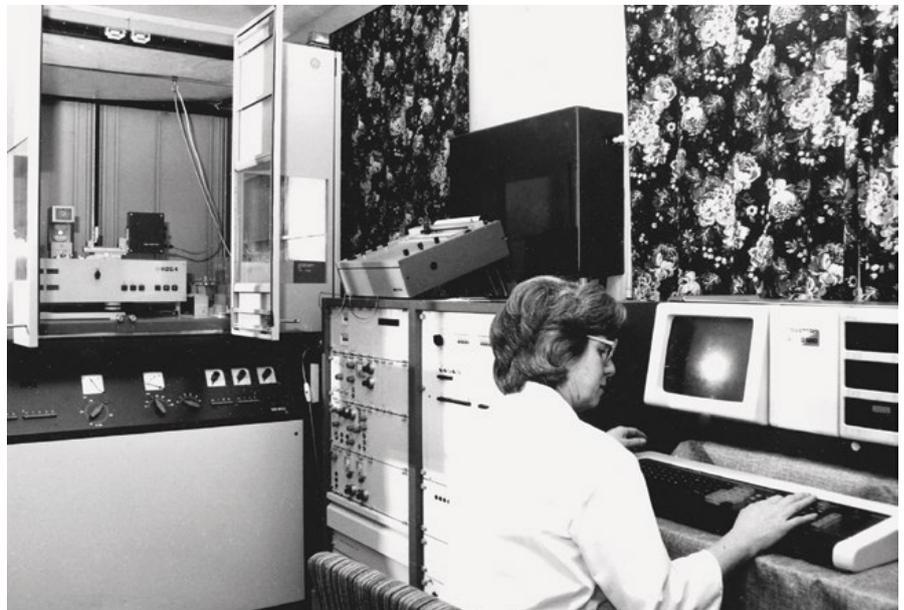


Abb. 6: I. Lohse am Diffraktometer HZG 4/A im Institut für Mineralogie (1988)

Forschungsschwerpunkt. Ausgehend von zwei vorangegangenen Rundtischgesprächen wurde 1965 die „Arbeitsgruppe Tonminerale und Phasenanalyse“ in der Gesellschaft für Geologische Wissenschaften unter Federführung von Dr. R. Starke ins Leben gerufen, die ihre Tätigkeit bis 1990 fortsetzte (Empfehlungen zur Probenpräparation und Messung, zur Kalibrierung und zur Datenevaluation, Erstellung von mineralogisch gut charakterisierten Referenzproben durch Ringversuche). Anwendungsbereiche der Röntgendiffraktometrie waren die Erdöl/Erdgas-Erkundung, die Standsicherheitsbeurteilung von Braunkohlenbegleitschichten und die geologische Grundlagenforschung.

Die Anschaffung eines HZG4-C 1984 und seine Umrüstung auf die computergesteuerte Variante HZG4-A im Jahr 1986 ermöglichte den notwendig gewordenen Umstieg von der analogen zur digitalen Interferenzregistrierung mit Rechnerunterstützung der Auswertung. 1990 konnte vom ehemaligen Institut für Mineralische Rohstoffe und Lagerstättenwirtschaft in Dresden ein URD6 mit Generator IRIS-M2 übernommen werden (1994 bis 2011 schrittweise Nachrüstung mit neuem Generator, Vollstrahlenschutzbox und Halbleiterdetektor). Das 1991 in Betrieb genommene Diffraktometer XRD 3000TT (Seifert, Hamburg) erlaubte mit seiner Software erste Anwendungen der Rietveld-Analyse.

Dieses Paket wurde nachfolgend durch Dr. R. Kleeberg (seit 1987 Laborleiter) sehr erfolgreich für die geowissenschaftlichen Fragestellungen des Labors ausgebaut. 1999 wurde vom Landesamt für Umwelt und Geologie ein Philips PW1830/PW3020 (Bj. 1993) übernommen und schließlich 2012 durch ein über das Helmholtz-Institut Freiberg im Rahmen des r³-intra-Projekts beschafftes Panalytical Empyrean mit zwei Detektorsystemen (Proportionalzähler/Graphitmonochromator sowie Pixcel3D/beta-Filter) und einer Anton-Paar CHC-plus Feuchteammer ersetzt.

Für den Einsatz der Röntgenografie relevante Forschungsprojekte aus den 1980er- und 90er-Jahren waren die hydrothermale Synthese von Magnesiumhydrosilikaten, die mineralogische Charakterisierung von Braunkohlenbegleitschichten, Braunkohlenfilteraschen und umweltrelevanten Boden- und Sedimentproben. Insbesondere die BMBF-geförderten geochemischen Projekte zur Schwermetallbelastung von Mulde und Elbe, die Untersuchung von Bergbauhalden und von arktischen Sedimenten erforderten zuverlässige quantitative Mineralphasenanalysen, insbesondere an tonmineralhaltigen Proben.

1994 begann eine lange, gute Zusammenarbeit mit Dr. Jörg Bergmann zur Entwicklung und zum Test des Rietveld-Programms BGMN (Bergmann et al., 1998). Das Labor war und ist auch an der Entwicklung des sehr erfolgreichen Programms AUTOQUAN für die Phasenquantifizierung (Fa. Seifert, jetzt bei GE Inspection Technologies) beteiligt (Taut et al., 1998).

Die methodischen Arbeiten auf dem Gebiet der quantitativen Phasenanalyse von fehlgeordneten Schichtsilikaten (Tonmineralen) mit dem Rietveld-Verfahren erforderten die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung der Beugungseffekte an derartigen Strukturen. Ein Durchbruch war die Einführung des „single-layer approach“ für die Beschreibung turbostratisch fehlgeordneter Schichtstrukturen (Ufer et al., 2004). Dieses Modell ermöglichte signifikante Verbesserungen bei der quantitativen Rietveld-Phasenanalyse von smektithaltigen Proben, einer bedeutenden Anwendung in der Rohstoffanalyse. Aktuell wird in mehreren laufenden Projekten die rekursive Berechnung von Wechselagerungsstrukturen für verschiedene Tonminerale innerhalb des Rietveld-Ver-



Abb. 7: Diffraktometer RD 7, der letzte Typ, der in der Präzisionsmechanik Freiberg entwickelt wurde (S. Mühlberg, Institut für Mineralogie 2012)

fahrens erprobt (z.B. Ufer et al., 2008).

Die langjährigen methodischen Arbeiten auf dem Gebiet der mineralogischen Phasenanalyse haben dazu geführt, dass sich das Labor unter den weltweit führenden Einrichtungen etablieren konnte. So belegte das Labor in den Jahren 2002 bis 2012 bei jeder Teilnahme am „Reynolds Cup“, einem internationalen Wettbewerb in der qualitativen und quantitativen Mineralphasenanalyse, jeweils einen der drei ersten Plätze unter bis zu 63 teilnehmenden Labors weltweit.

In der zweiten Hälfte der 1960er-Jahre übernahm R. Starke die Röntgenausbildung für die Mineralogiestudenten, die bis dahin vom Institut für Metallkunde getragen wurde. Seit 1990 wurde dieser Lehrkomplex zusammen mit der Tonmineralogie schrittweise an R. Kleeberg übertragen, der ihn seit 1997 vollständig vertritt. Speziell für die studentische Ausbildung wird ein Diffrak-

tometer RD 7 (1993, Präzisionsmechanik Freiberg) eingesetzt.

Institut für Keramik, Glas und Baustoffe (T. Westphal)

Lehrveranstaltungen zur Röntgenstrukturanalyse für Studenten der Fachrichtung Silikatechnik wurden erstmals Anfang der 1960er-Jahre von Dr. Josef Sedivy (Institut für Metallkunde) gehalten. Seitdem ist die Röntgenstrukturanalyse Bestandteil des Lehrinhalts am Institut. Ab 1962 wurde eine Halbwellenapparatur M60 des VEB Transformatoren- und Röntgenwerks Dresden für Filmtechniken genutzt. Ab 1966 stand ein stabilisierter Generator M61 mit einem Diffraktometer HZG1 und später auch einem HZG3 (VEB Freiburger Präzisionsmechanik) zur Verfügung. Insbesondere Dr. Rolf Strienitz leistete 1970/71 wertvolle Aufbauarbeit für das Röntgenlabor, das er bis 1974 leitete. Ihm folgte Dipl.-Min. Hartmut Berger, der jedoch 1984 nach Kuba wechselte, sodass R. Strienitz wieder das Labor übernahm.

Im Zuge der Modernisierung nach 1990 wurde für das Institut ein Röntgendiffraktometer PW 1820 von Philips beschafft. Hinzu kam noch eine Hochtemperaturkammer, die jedoch nach ihrem Testbetrieb leider nicht für Forschungsvorhaben genutzt wurde. Seit 2008 verfügt das Institut über ein PANalytical-Diffraktometer X'PERT Pro MRD PW 3040/60 mit PIXcel-Detektor für schnelle 0-, 1- und 2-dimensionale Detektion und einer Cryo&Humidity Chamber CHC (Kühl-/Feuchteammer) von Anton Paar. Das Diffraktometer kann in Reflexion

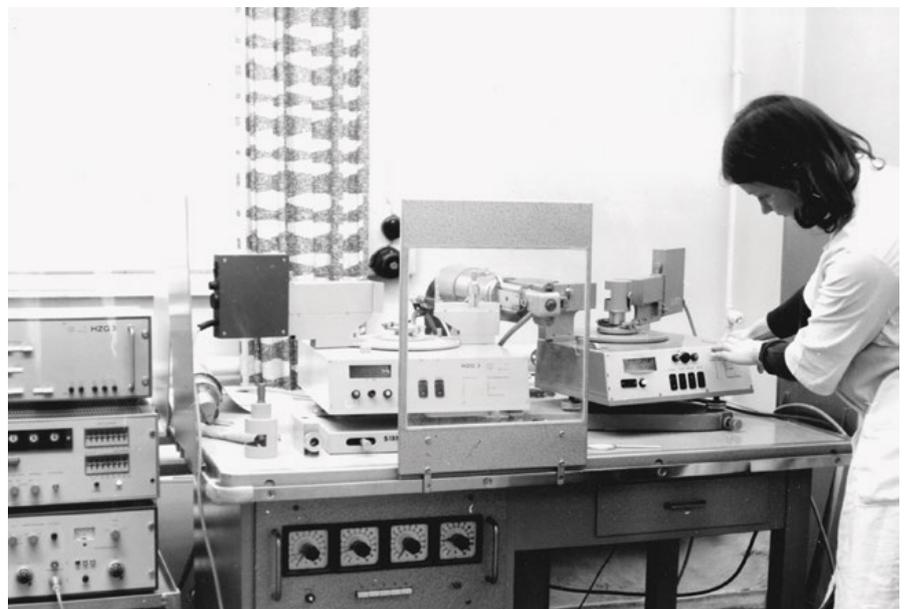


Abb. 8: Frau Petzold am Diffraktometer HZG1 und HZG3 (SVST 1975)

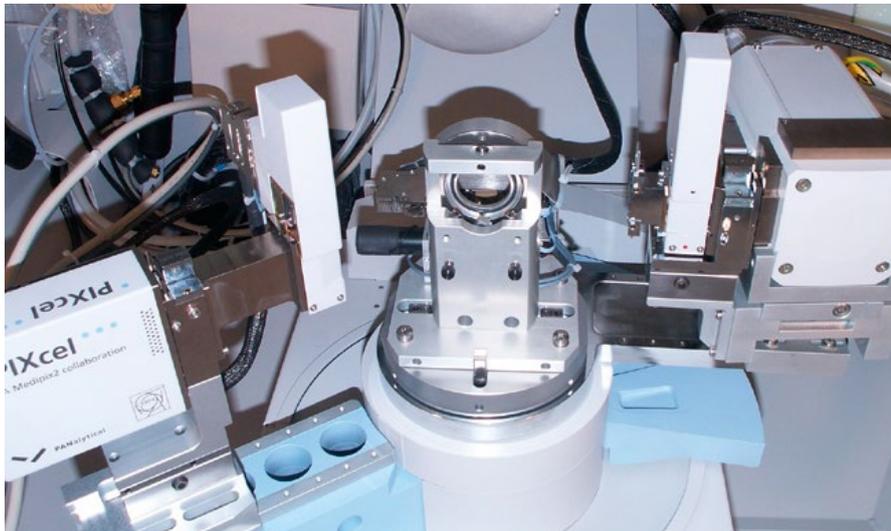


Abb. 9: X'PERT Pro MPD (PW 3040/60) Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik (2012)

und in Transmission betrieben werden. Ab 2003 übernahm Dr. Westphal die Leitung des Röntgenlabors.

Die Röntgendiffraktometrie bedeutete für alle Bereiche des Instituts ein wichtiges Werkzeug zur Materialcharakterisierung. Die Dissertation von E. Schlegel 1967 war die erste größere Arbeit, die sich in wichtigen Teilen auf röntgenografische Phasenanalysen stützte (Entsäuerung, Sinterung und Schmelzverhalten von Kalkstein, Magnesit und Dolomit in Gegenwart von Flussspat im Temperaturbereich bis 1600°C). Daran schlossen sich Struktur- bzw. Defektanalysen aus Linienverbreiterungen bei Calcium- und Magnesiumoxiden an (CaO- und MgO-Gehalt in gesinterten Baustoffen sowie die Reaktivität dieser Oxide). Im Zusammenhang mit Forschungen zu dampfgehärteten Baustoffen waren die Beschreibung und quantitative Bestimmung von Calciumsilikathydraten (C-S-H) langjährige Forschungsschwerpunkte des Röntgenlabors.

Die Ergebnisse dieser seit 1997 forcierten Arbeiten wurden 2006 unter dem Titel „Bildung und quantitative Bestimmung von tobermoritischen Phasen in dampfgehärteten Baustoffen mittels Röntgenverfahren nach Rietveld“ in den Freiburger Forschungsheften publiziert.

Prof. Thomas A. Bier, seit 2002 Inhaber des Lehrstuhls für Baustofftechnik, verlagerte die Forschung in Richtung Trockenmörteltechnologien – mit Konsequenzen für die Arbeit des Röntgenlabors. Mit der Beschaffung des X'PERT Pro MRD im Jahr 2008 war dieser Übergang abgeschlossen. Nunmehr stehen In-situ-Phasenanalysen zur Verfolgung der Phasenentwicklung während der Er-

härtung anorganischer Bindemittel im Vordergrund.

Neben den eigenen Forschungsarbeiten waren und sind Analysen als Dienstleistungen für andere Arbeitsgruppen inner- und außerhalb des Instituts Teil der täglichen Arbeit. So nimmt die Bereitstellung von Messdaten für Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Keramik mehr als die Hälfte der Messzeit in Anspruch. Wiederkehrende Aufgaben sind seit Jahrzehnten u. a. Quarzgehalts- und Tonmineralanalysen zur Beurteilung keramischer Rohstoffe. In jüngerer Zeit sind Stoffsysteme wie kohlenstoffgebundene Feuerfestmaterialien, Portland- und Tonerdezement sowie Zirkonoxidkeramiken in den Fokus der Dienstleistungsanalytik gerückt.

Erstes Physikalisches Institut (P. Deus, H. Stöcker)

Nach Ausgliederung der Röntgenabteilung aus dem Physikalischen Institut dauerte es 18 Jahre, ehe 1965 am

I. Physikalischen Institut der Sektion Physik (ab 1968 unter der Leitung von Prof. H. A. Schneider) wieder ein Röntgenlabor eingerichtet werden konnte. Damit beauftragt wurde Peter Deus, der zunächst Untersuchungen in der Röntgengruppe der Mineralogie startete. Zur Arbeitsgruppe gehörte wenig später auch Frau Dr. U. Voland. Später verfügte die Arbeitsgruppe über eigene Röntgenanlagen vom Typ M61 und M62 mit Diffraktometer HZG1, HZG3 und HZG4. Im Eigenbau entstanden für die Diffraktometer Tief- und Hochtemperaturzusätze, die Messungen zwischen 30 und 600 K erlaubten.

Die ersten Arbeiten von P. Deus zielten auf die Ermittlung der Fe/Mn-Verhältnisse in Fe-Mn-Ca-MgCO₃ mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz. In diesem Zusammenhang machte es sich erforderlich, Verbesserungen der Strahlengeometrie zur Intensitätssteigerung vorzunehmen und ein geeignetes und stabiles Monitorsystem zur Intensitätskontrolle zu entwickeln, das auch Gegenstand seiner Dissertation wurde (Verteidigung 1971).

Im Rahmen der IFG Halbleiter an der Bergakademie wurden ab etwa 1970 Arbeiten zur Temperaturabhängigkeit von Gitterparametern und Gitterschwingungsamplituden (Debye-Waller-Faktoren, Debye-Temperaturen) diamantartiger Verbindungshalbleiter der Typen III-V, II-VI und II-IV-V2 (besonders ZnSiP₂) gestartet. Tieftemperaturmessungen von Gitterparametern wurden in Zusammenarbeit mit der Röntgengruppe der Sektion Metallurgie und Werkstofftechnik ausgeführt (Anwendung des Bond-Verfahrens mit Zweikreis-Gonio-meter SGO 1.1, ergänzt durch einen mit flüssigem He betriebenen Tieftempera-



Abb. 10: Diffraktometer HZG1 mit Hochtemperaturzusatz (Physik 1978)

turzusatz). Im Ergebnis konnten die theoretisch zu erwartenden negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von III-V-Verbindungen nachgewiesen werden. P. Deus habilitierte sich 1983 mit einer Arbeit über die Gitterdynamik der diamantartigen Halbleiterverbindungen. Nach Weggang auch von Dr. U. Voland wurde das Röntgenlabor 1994 aufgelöst und ein Teil der apparativen Einrichtungen in das Institut für Metallkunde überführt.

Seit 2010 wird ein neues Röntgenlabor des Instituts für experimentelle Physik unter der Leitung von Prof. D. Meyer und Dr. H. Stöcker im Gellertbau eingerichtet. Forschungsschwerpunkte sind die Charakterisierung von unter Raumbedingungen hergestellten Nanometer-Dünnschichten sowie die In-situ-Diffraktometrie zur Untersuchung der strukturellen Auswirkung elektrischer Felder in oxidischen Halbleiterkristallen. Methodische Weiterentwicklungen betreffen die anisotrope Streuung unter resonanter Anregung zum Studium der lokalen Symmetrie von Punktdefekten. Dazu wird im Rahmen der Erweiterung des Hamburger Synchrotronlabors Petra III die „Chemical Crystallography Beamline P24“ aufgebaut.

Institute für NE-Metallurgie und Reinstoffe sowie für Eisen- und Stahltechnologie (H. Baum)

Nach lange dauernden Bemühungen konnte 1966 am damaligen Institut für Eisenhüttenkunde eine Kombination eines Diffraktometers PW 1150 und eines Vertikalfluoreszenzspektrometers der Fa. Philips mit einem Generator Müller-Mikro 111 der Fa. C.H.F. Müller aufgebaut werden. Die Diffraktometrie wurde insbesondere für quantitative α/γ -Phasenanalysen (Umwandlungsverhalten von Stählen, ZTU-Schaubilder), zur Phasenanalytik nitrierter Eisenwerkstoffe und von Stahlisolaten genutzt. Das Diffraktometer PW1150 wurde Ende der 1970er-Jahre in die Fachabteilung Feinstrukturanalyse der Sektion Metallurgie und Werkstofftechnik (SMWT) umgesetzt.

1965 erwarb das Institut für NE-Metallurgie und Reinstoffe eine Röntgenanlage M61 mit Diffraktometer HZG1 für Phasenanalysen und einfache Texturbeurteilungen (Dr. E. Buhrig). Auch dieses Gerät wurde mit Gründung der SMWT in die Fachabteilung Feinstrukturanalyse dieser Sektion umgesetzt.

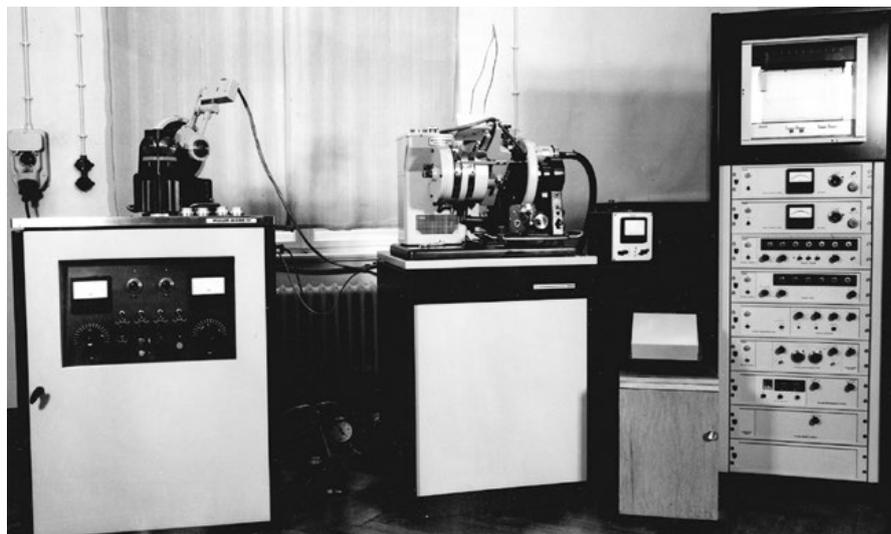


Abb. 11: Diffraktometer PW 1150 und Fluoreszenzspektrometer von Philips (SMWT 1978)

Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) (S. Starke, M. Kurková)

Eines der jüngsten Röntgenlabore an der TU Bergakademie wurde im Jahre 2000 am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Prof. Dr. B. Meyer) eingerichtet. Es verfügt über ein Diffraktometer D8 Discover der Firma Bruker AXS, mit dem Hochtemperaturuntersuchungen bis 1600 °C in der MRI Radiation-Kammer oder Hochdruckuntersuchungen bis 20 bar und 1000 °C in der TCP 20-Kammer ausgeführt werden können. Als ortssensitive Detektoren kommen lineare und 2D-Systeme zum Einsatz. In der Kooperation mit Industriepartnern (Vattenfall, RWE, HKW Cottbus) stehen die phasenanalytischen Untersuchungen zur Heißgaskorrosion von Werkstoffen sowie die Ermittlung der Verschlackungsneigung von Brennstoffgemischen in Kraftwerkskesseln (Vertragsforschung Dr. M. Kurková) und des Ansatzbildungspotenzials von Braunkohlen in Dampferzeugern (TU Bergakademie, Dissertation Dr. M. Muhammadieh 2007) im Brennpunkt. Hinzu kommt neuerdings die Analyse von Phasenänderungen unter dem Einfluss von Temperatur, Druck und Gasatmosphäre (oxidierend oder reduzierend) an natriumreichen und siliziumarmen Aschen (M. Kurková, S. Starke: Mineral composition of ash using X-ray diffractometry; 5th International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies, 21-24 May 2012, Leipzig, Germany).

Im Auftrag des Lehrstuhls Reaktionstechnik am IEC (Prof. Dr. S. Kureti) wurde die phasenanalytische Überprüfung des homogenen Aufbringens von

aktiven Schichten auf Al_2O_3 -Trägermaterialien (Gamma Spinell), in strukturierten Katalysatoren für die Autoindustrie verfolgt (Dr. F. Conrad).

Die Leitung des Labors liegt nunmehr in den Händen von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Starke (wissenschaftliche Mitarbeiter: Dr. Schreiner, vorher Dr. Kurkova).

Schlussbemerkung

Es gibt wohl keine andere festkörperanalytische Untersuchungsmethode, die an der TU Bergakademie so weit verbreitet ist, wie die Röntgenografie. Das hat die Aufgabe, ihre mehr als acht Jahrzehnte umfassende Historie an der Bergakademie zu verfolgen und ihren heutigen Stand darzustellen, sehr interessant, aber eben nicht gerade leicht gemacht. Der Umfang des Beitrags, der auch als Würdigung der Entdeckung der Röntgeninterferenzen durch Max von Laue vor 100 Jahren (1912) zu verstehen ist, machte es notwendig, ihn in zwei Teilen zu publizieren, die natürlich eng miteinander verknüpft sind.

Danksagung: Ohne die aktive Mitwirkung zahlreicher ehemaliger und vor allem derzeitiger Mitarbeiter in den Röntgenlaboren der verschiedenen Institute wäre diese doch recht umfangreiche Darstellung nicht zu bewältigen gewesen. Ihnen sei nachdrücklich gedankt, sie sind in den betreffenden Kapitelüberschriften namentlich aufgeführt. Die Autoren danken Dr. H. Kaden und Herrn R. Volkmer (Archiv) sowie Frau B. Gelius und Herrn A. Ludwig (Medienzentrum) vielmals für ihre tatkräftige Unterstützung bei den notwendigen Rechercharbeiten. Die Auswahl der Bilder erfolgte so, dass in Verbindung mit Teil I dieser Publikation möglichst viele Gerätetypen dargestellt und insbesondere technische Mitarbeiter namentlich benannt werden konnten. Die in den Bildunterschriften angegebenen Jahreszahlen beziehen sich auf den Zeitpunkt der Entstehung der jeweiligen Aufnahme, nicht auf das Anschaffungsjahr des Geräts.

Johann Sebastian Bach und der Ursula-Erbstollen

– Teil 2 –

Eberhard Spree¹

„Berg-Bau, dadurch wird alle Arbeit im Bergwercke durchgehends verstanden, und ist eine solche Sache, wodurch einem Lande viel Nahrung zugebracht, und das Commercium dabay erhalten wird, viel armes Volck ihren Unterhalt davon bekommt, im übrigen aber eine milde, und freygebige Hand haben will.“

(Minerophilo, Bergwercks-Lexicon, Chemnitz 1743)

2010 entdeckte ich im Bergarchiv Freiberg 44 Zechenregister, in denen 38 Mal der Name Johann Sebastian Bach erwähnt wird. Dass Bach einen Bergwerksanteil (Kux) besaß, war seit langer Zeit bekannt. Mit Hilfe dieser Dokumente ist es aber erstmals möglich, diesen Besitz näher zu untersuchen.

Zechenregister wurden quartalsweise erstellt. Die jeweils 13-wöchigen Rechnungsabschnitte trugen die Namen Reminiscere, Trinitatis, Crucis und Lucia. Die Register geben Auskünfte über die Einnahmen, Ausgaben und Vorräte der jeweiligen Grube. In ihnen sind auch die Namen der Anteilseigner (Gewerken), die Höhe ihres Anteils und häufig auch Berufsbezeichnungen, Titel und Wohnorte aufgeführt.

Im ersten Quartal (Reminiscere) 1741 wurde Johann Sebastian Bach Gewerke des Ursula-Erbstollens. Er besaß nun einen Bergwerksanteil (Kux) dieser Zeche, von denen diese 128 vergab. Als Anteilseigner hatte er Rechte und Pflichten. Vor allem musste er, falls das Bergwerk allein durch den Verkauf des gewonnenen Silbers nicht betrieben werden konnte, regelmäßige Zuzahlungen (Zubuße) leisten, die alle drei Monate kassiert wurden. Im Falle von Gewinnen der Zeche (Ausbeute), wäre er anteilig beteiligt worden. Solche konnte der Ursula-Erbstollen aber nicht erwirtschaften. Dieses Bergwerk war auf die finanzielle Unterstützung seiner Anteilseigner angewiesen und damit eine Zubußezeche.

Die rechtlichen und finanziellen Grundlagen für den kursächsischen Bergbau hatten sich über Jahrhunderte entwickelt. Der Bergbau war ein wichtiger Wirtschaftsfaktor und bewirkte,



Abb. 1: Der Autor bei der Arbeit im Bergarchiv Freiberg

dass Kursachsen als ein reiches Land galt. So wurden im Bergrevier Freiberg, in dem sich ungefähr ein Drittel der kursächsischen Zechen befand, zu Bachs Zeit um die 7.000 Kilogramm Silber pro Jahr gewonnen.

Um die besonders ergiebigen Erzgänge zu finden, brauchte man zahlreiche Zechen. Diese benötigten immer eine Anschubfinanzierung, die bei den meisten Zechen von den Gewerken übernom-

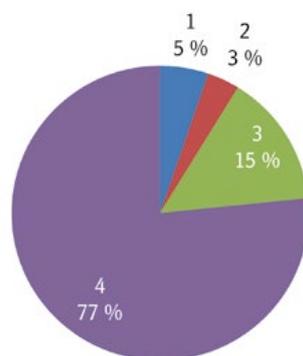


Abb. 2: 171 Bergwerke im Freiberg Revier (Reminiscere 1741), davon

- 1 9 auf königliche Kosten bewirtschaftet
- 2 6 von Communen (Städte) finanziert
- 3 25 Eigenlehnerzechen (von den abbauenden Bergleuten bewirtschaftet)
- 4 131 vergewerkschaftet (in der Verantwortung von Gewerken stehend)

men wurde. Allerdings waren die meisten Bergwerke nie in der Lage, auf diese Zuzahlungen zu verzichten bzw. waren nach Zeiten höherer Silbergewinnung wieder auf sie angewiesen. Über diese Verhältnisse konnte man sich in den Ausbeutbögen informieren, die für jedes Quartal neu gedruckt wurden (siehe Abbildungen 2 und 3, die nach dem Ausbeutbogen Reminiscere 1741 erstellt wurden).

Da es nur sehr selten geschah, dass aus einer Zubuße eine Ausbeutezeche wurde, war für den Gewerken einer Zubußezeche ein Hoffen auf schnellen Gewinn unrealistisch. Er musste eine langfristige Hoffnung haben, die über seine eigene Lebenszeit hinausging, wie aus einer Bergpredigt von 1736 hervorgeht: „Gott gefället es, nicht zu allen Zeiten, auch nicht an allen Orten ganghafftige Ertze zu geben sondern zu gewissen Zeiten hie und da nur gute Nieren, die Menschen dadurch zugewöhnen, daß sie mit wenigen zufrieden seyn, und doch auch, auf Hoffnung zu bauen, begierig gemacht werden. Auf solche Weise sind theils Wercke über 80. biß zu 100. und oft mehr Jahren, fortgebauet worden, ehe es zum Überschuß gekommen, da es doch in so langer Zeit an baulustigen Gewercken nicht gefehlet hat. Sind gleich viele davon weggestorben, oder sonst aus dem Felde

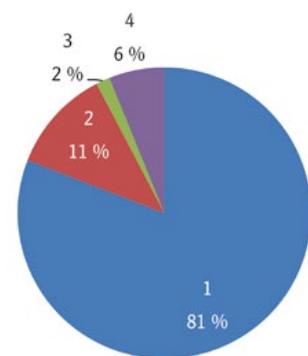


Abb. 3: 131 Bergwerke im Freiberg Revier, die durch Gewerkschaften gebaut werden (Reminiscere 1741), davon

- 1 106 Zubußezechen (wurden mit Hilfe der Zuzahlungen der Anteilseigner bewirtschaftet)
- 2 15 Zechen, die durch den Verkauf ihrer gewonnenen Erze bewirtschaftet wurden
- 3 2 Verlagszechen (konnten gezahlte Zubußen an ihre Anteilseigner zurückzahlen)
- 4 8 Ausbeutezechen (zahlten Gewinne an ihre Anteilseigner aus)

¹ Eberhard Spree, Mitglied des Gewandhausorchesters

gegangen, so haben doch andere wieder solchen Abgang ersetzt, und ihre Zubusse erleget.“

Im Moment der Zubußzahlung galten für den Gewerken aber die Worte, die in einem Bergwerks-Lexikon von 1743 nachzulesen sind: „Bergwerk bauen ist eine freye, ungezwungne Nahrung welches zu erheben und in gutem Wohlstand zu erhalten, nach derer Alten Regel nicht eines Mannes Thun ist, sondern darzu aus allen Ständen viele, die ihr Geld dem gemeinen Wesen zum Besten, mit guten Herzen anwenden, unumgänglich von nöthen sind, so gar, daß ohne demselben Beytrag alle andere Anstalt und Ordnung, wie gut und löblich dieselbe auch seyn mag, umsonst.“

In der Gesamtheit wurde den Gewerken aber kein Geld entzogen. Das Verhältnis zwischen den Zubußzahlungen, die viele Gewerken an ihre Zechen abführten, und den Ausbezahlungen, die einige wenige Gewerken erhielten, war zu Bachs Zeit nahezu ausgeglichen.

Im Freiburger Revier vergaben mehr als 130 Bergwerke je 128 Anteile. Auf ganz Kursachsen hochgerechnet kursierten also mehr als 45.000 Anteile. Es war also überhaupt nichts Ungewöhnliches, dem Bergbau durch den Besitz von Kuxen verbunden zu sein. Damit stand der kursächsische Bergbau auf einer breiten gesellschaftlichen Basis.

Es stand dem Gewerken frei, wie lange er seinen Zubußzahlungen nachkam. Stellte er sie ein, wurde sein Anteil im Retardat verstanden und verfiel damit für ihn. Retardatkuxe wurden neu verteilt und zuerst den Gewerken der Zeche angeboten. Wenn sie dort nicht verteilt werden konnten, war der Schichtmeister beauftragt, neue Interessenten zu finden, die bereit waren, mit ihren Zubußzahlungen den Betrieb der Zeche aufrechtzuerhalten.

Mit großer Sicherheit wurde Bach 1741 ein solcher Retardatkux angeboten. Obwohl ein Kux des Ursula-Erbstollen zu dieser Zeit mit 30 Talern vom Bergamt taxiert wurde, wird er ihn umsonst erhalten haben, denn mit der Taxierung von Zubußzechen wurde vor allem die Qualität der Grubengebäude und weniger die Höhe der Silbergewinnung bewertet. Das wird auch beim Vergleich der *Abbildungen 4* und *5* deutlich.

Bei Bergwerken, die Gewinne (Ausbeute) an ihre Gewerken auszahlen konnten, war das anders. Hier galten die Taxierungen für die Kuxe als Richtwerte für den Kauf und Verkauf.

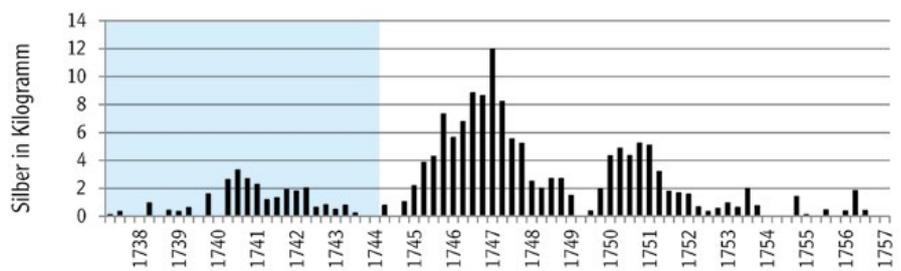


Abb. 4: Silbergewinnung Ursula-Erbstolln

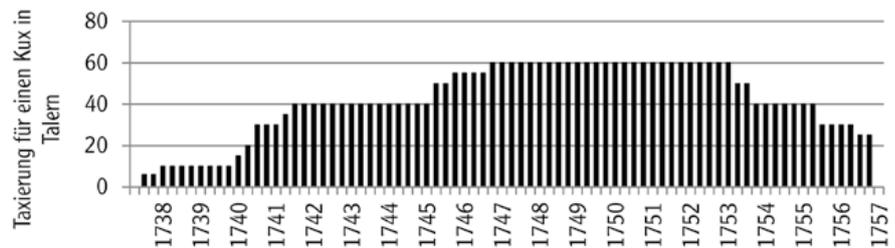


Abb. 5: Taxierung für einen Kux, Ursula-Erbstolln

Im Gewerkenverzeichnis des Zechenregisters des Ursula-Erbstollens tauchte Reminiscere 1741 neben Bach noch ein neuer Gewerke aus Leipzig auf, der Handelsmann Johann Samuel Lamprecht, und bis zum Ende des Jahres kamen drei weitere hinzu.

Den Abrechnungen des für Leipzig zuständigen Zubußboten Johann Christoph Stiehl ist zu entnehmen, dass ihre Zahlungsmoral deutlich besser war als die anderer Gewerken. Insgesamt erhält der Ursula-Erbstollen für die Jahre 1741 bis 1744 nur rund 70 % der geforderten Zubußen.

Ab 1744 ist eine deutliche Abnahme der Zahlungswilligkeit der Leipziger Gewerken zu erkennen. Crucis 1744 lässt ein Leipziger Gewerke, nachdem er für vier Quartale keine Zubuß mehr gezahlt hatte, seinen Anteil verfallen (der Kux wurde im Retardat verstanden). Im ersten Quartal 1745 werden die Anteile von Johann Sebastian Bach und auch von Johann Heinrich Trögemüller und Florentina Anna Sophia Ruhe im Retardat verstanden. Es ist auffällig, dass in diesem Quartal nur Leipziger Gewerken ihre Anteile verfallen lassen.

Höchstwahrscheinlich signalisierten sie selbst, dass sie sich von ihren Anteilen trennen wollten, denn Zubußschulden von 4 Talern bzw. 5 Talern für einen Kux, wie sie bei ihnen vorlagen, hatten beim Ursula-Erbstollen nicht zwingend die Folge, dass ein Anteil im Retardat verstanden wurde. Es gab zu diesem Zeitpunkt Gewerken, die sieben und acht Quartale mit ihren Zahlungen im Rückstand waren. Es wäre auch möglich

gewesen, zwischenzeitlich einen geringeren Betrag an Zubuß zu zahlen (sich anhängig machen, wie der bergmännische Ausdruck dazu lautet), damit der Anteil nicht ins Retardat gesetzt wurde.

Auffällig ist, dass zu einer Zeit die Zubußzahlungen eingestellt wurden, in der durch den Ursula-Erbstollen immer weniger und schließlich kein Silber mehr gewonnen wurde (*siehe Abb. 4, blau markierter Bereich*). An der Höhe der geforderten Zubuß war das nicht abzulesen, man könnte aber Informationen über die Zeche eingeholt haben. Die Bergämter waren verpflichtet, darüber Auskunft zu geben und auch vor „unnützlichen Gebäuden“ zu warnen.

Aus den Zechenregistern kann abgeleitet werden, dass Bach als einer der letzten dieser Leipziger Gewerken seine Zahlungen einstellte. So dürfte eine Initiative für den gemeinschaftlichen Ausstieg nicht von ihm ausgegangen sein.

Es war nicht ungewöhnlich, einen Kux verfallen zu lassen. Von 1741 bis 1744 wurden beim Ursula-Erbstollen über 110 Kuxe im Retardat verstanden, obwohl die Taxierung des Bergamts für einen Kux in dieser Zeit von 30 auf 40 Taler gestiegen war. Auch das ist ein Hinweis darauf, dass hier kein Handelswert angegeben wurde.

Luciae 1746 erscheint Bachs Name aber erneut unter den Gewerken des Ursula-Erbstollens. Seine erneute Bereitschaft, den Ursula-Erbstollen finanziell mitzutragen, dürfte mit der dortigen Entwicklung zusammenhängen. Seit 1745 war die Menge des dort gewonnenen Silbers wieder deutlich angestiegen.

halten haben, die eine „*Oeconomische Encyclopädie*“ von 1792 beschreibt: „*Wenn man Kuxe kaufen will, muß man sich nicht nach dem auf den Ausbeute-Bogen zu einer jeden Grube gesetzten Kux-Preise richten, [...] bey Gruben-Gebäuden, welche in einer solchen Verfassung sind, daß sich die darauf bauenden Gewerken, zwar unter der besten ihnen bergmännisch zugeredeten Aufmunterung, dennoch eines nahe zu seyn scheinenden Gewinnes mit keiner Gewißheit schmeicheln dürfen, kann man einen Kux weit unter dem gesetzten Preise bekommen, und auf geringen Zubeuß-Zechen zuweilen um 1 Groschen kaufen.*“

Zum Ausgleich eines geringen Kaufpreises könnte Bach auch Zubeußschulden des alten Besitzers übernommen haben. Das Zechenregister von Luciae 1746 weist über 90 Taler aus, die in diesem Quartal an ausstehenden Schulden eingekommen waren, sodass diese Möglichkeit durchaus denkbar ist. Da der Besitz dieses Anteils aber nach wie vor die Verpflichtung zur regelmäßigen Zubeußzahlung nach sich zog, dürfte von Bach – wenn überhaupt – nur ein geringer Betrag für diesen Kux gezahlt worden sein.

Ein Hinweis, dass dieser Anteil keinen großen Wert gehabt hat, ist in einem Zechenregister kurze Zeit später zu finden. Im dritten Quartal 1747 ließ der Kammerjunker Ludwig Ehregott von Burgsdorff aus Weißenfels 4 Kuxe verfallen. Sie werden in den nächsten Quartalen nicht an neue Besitzer vermittelt – ein Zeichen dafür, dass es auch keine große Nachfrage nach Kuxen dieser Zeche gab.

Es ist kaum anzunehmen, dass Bach, nachdem er seinen Anteil erst 1745 verfallen ließ, besondere Anstrengungen unternahm, erneut einen Kux dieser Zeche zu bekommen; auch dieses Mal wird man an ihn herangetreten sein.

Es ist aber auffällig, dass zwischen Crucis 1745 und Crucis 1749 keine weiteren Anteile dieses Bergwerks verfielen. Offensichtlich hatten die Gewerken eine gewisse Hoffnung auf eine weitere positive Entwicklung. Auch die Zahlungsmoral der Gewerken verbesserte sich deutlich. Es standen aber Luciae 1746 immer noch insgesamt 222 Taler, 3 Groschen und 9 Pfennige Zubeußzahlungen durch Gewerken aus, was laut Bergresolution von 1709 nach einem Quartal das Retardat nach sich ziehen sollte, aber „... *bey geringen Mineralien wird das Retardat so genau nicht observet*“. Beim Ursula-Erbstollen war man

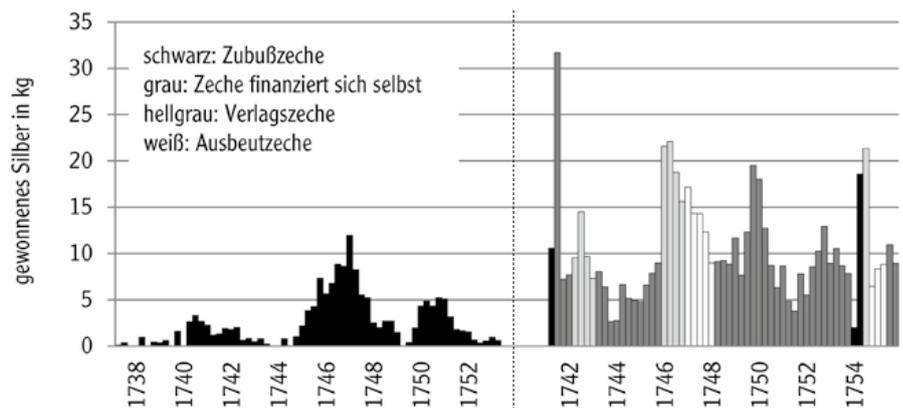


Abb. 7: Gewonnenes Silber pro Quartal, links Ursula-Erbstolln, rechts Morgenstern-Erbstolln

offensichtlich trotz steigender Silbergewinnung immer noch nicht in der Lage, das Retardat streng zu handhaben, denn das hätte bedeutet, dass Gewerken, die mehr als ein Quartal Zubeußschulden hatten, ihrer Anteile verlustig gingen.

Bei anhaltend positiver Entwicklung hätte der Ursula-Erbstollen nach einer gewissen Zeit auf Zubeußzahlungen verzichten können. Später wären gezahlte Zubeußen zurückgezahlt worden (Verlagszeche), bevor die Anteilseigner Gewinne (Ausbeute) erhalten hätten. Luciae 1746 weist der Ausbeutbogen nur fünf Ausbeutzechen im Freiburger Revier aus, die dazu in der Lage waren. Der Morgenstern-Erbstollen entwickelte sich in dieser Zeit in der beschriebenen Art und Weise. An Ausbeute konnte er aber nur zwischen 1 und 2 Talern pro Quartal und Kux zahlen. Ein Vergleich der Silbergewinnung mit dem Ursula-Erbstollen ist in *Abb. 7* dargestellt.

Einem Kuxkränzler stand für seine Vermittlung nur ein „*Trinkgeld, so von Verkäufern und Käuffern ihm gutwillig gereicht wird*“ zu. Wenn man davon ausgeht, dass bei diesem Anteilswechsel keine oder nur geringe Geldmengen flossen, konnte Stiehl wohl kaum nennenswerte Beträge für eine Vermittlung erwarten. Er war aber auch weiterhin als Zubeußbote dafür zuständig, in Leipzig Zubeußen einzusammeln. Pro eingenommenen Taler erhielt er 1½ Groschen, und Bach zahlte in den nächsten Jahren wieder 1 bis 1½ Taler Zubeuß pro Quartal.

Viele Bergleute und Handwerker, aber auch Studenten, Kaufleute, Akademiker, Geistliche, hohe Bergbeamte und Mitglieder des Adelsstands gehörten der Gewerkschaft des Ursula-Erbstollens an. Auffällig ist der Frauenanteil unter den Anteilseignern. So befanden sich Reminiscere 1741 unter den 86 Gewerken der Zeche 20 Frauen.

Eine solche Zusammensetzung einer Gewerkschaft war im kursächsischen Bergbau nicht außergewöhnlich.

Die Silbergewinnung durch den Ursula-Erbstollen war aber bald schon wieder rückläufig. Bach zahlte aber bis an sein Lebensende die geforderten Summen. Damit unterschied er sich von vielen anderen Anteilseignern, die in dieser Zeit ihre Zahlungen einstellten, aber trotzdem Mitglieder der Gewerkschaft blieben.

Es ließen bald auch wieder Gewerken ihre Anteile verfallen, so die Familie von Hohenthal aus Leipzig, die mehrere Kuxe des Ursula-Erbstollens besaß. Johann Sebastian Bach dürfte sie gekannt haben, hatte er doch zur Hochzeit des Ehepaares 1725 eine Kantate komponiert.

Offensichtlich erschien es Bach nicht wichtig, die Entwicklung der Zeche besonders intensiv zu verfolgen. Wie viele andere Anteilseigner vergrößerte auch er Reminiscere 1750 seinen Anteil. Ähnlich wie 1741 wurden Retardatkuxe neu verteilt. Nun besaß er 1½ Kux, und damit erhöhte sich anteilig seine Zubeuß. Es kann als sicher gelten, dass Bach als zubeußzahlender (getreuer) Gewerke diesen Anteil umsonst erhielt.

In diesem Quartal wurde übrigens auch der Berghauptmann Hans Carl von Kirchbach Gewerke des Ursula-Erbstollens. Die Zubeuß für den Ursula-Erbstollen betrug Reminiscere 1750 pro Kux 1 Taler. Kirchbach zahlte jedoch in den beiden ersten Quartalen für seine zwei Kuxe nur jeweils 1 Taler und 8 Groschen. Das war genau der Wert, der einem geprägten Taler entsprach (1 spec. Taler = 32 Groschen, die Angaben in den Abrechnungen waren Rechnungstaler: 1 Rechnungstaler = 24 Groschen). Im dritten Quartal setzte er sogar mit der Zahlung aus und nahm sie danach wieder auf. Dieses Beispiel zeigt, dass es

offensichtlich nicht ehrenrührig war, mit den Zubezahlungen in Verzug zu kommen. Es gab unter den Gewerken des Ursula-Erbstollens hohe Bergbeamte und Leute von Adel, die ihren Zahlungen so unregelmäßig nachkamen, dass der Eindruck entsteht, ihre Namen dienten vor allem als eine Art Aushängeschild für die Zeche. Sicher versuchten auch einige Gewerken, Insiderwissen zu nutzen. Es war möglich, Anteile in den Besitz zu bringen, von denen man sich eine gewisse Wertentwicklung versprach, um sie dann zu verkaufen. Durch geschicktes Aussetzen bei den Zubezahlungen konnte man Anteile vieler Zechen besitzen, ohne eine zu große finanzielle Belastung zu haben. Für Bergleute mögen auch bestimmte Privilegien, die mit einem Kuxbesitz verbunden waren, eine Rolle gespielt haben. Es gab aber vor allem Gewerken wie Johann Sebastian Bach, die ihren Zahlungsverpflichtungen nachkamen. Sie waren die Träger dieses über Jahrhunderte bestehenden Finanzierungssystems.

Ende März 1750 unterzog sich Bach einer ersten und Anfang April 1750 einer zweiten Augenoperation. Wie dem Zechenregister Trinitatis 1750 zu entnehmen ist, kam er aber auch unmittelbar danach seiner Zubezahlung nach. Es ist aber die letzte finanzielle Unterstützung, die er dem Ursula-Erbstollen zukommen lassen konnte. Die Augenoperationen und die Folgebehandlungen schwächten ihn so, dass er am 28. Juli 1750 verstarb. Nach seinem Tod fertigte man für die Erbaufteilung eine Auflistung seines gesamten Besitzes an. Daran war auch die Witwe Bach beteiligt. In dieser Aufstellung ist der Posten „Ein Kux, genannt Ursula Erb-stollen, zu Klein Voigtsberg an Werthe ... 60 Taler“ zu finden. Laut Zechenregister besaß Bach aber $1\frac{1}{2}$ Kuxe. Das müsste auch Anna Magdalena Bach bekannt gewesen sein, ist doch davon auszugehen, dass man nach dem Ableben ihres Mannes mit den Zubezahlungen an sie herangetreten ist. Den dabei vorgelegten Zubezahlzetteln hätte die Anteilsgröße entnommen werden können. Außerdem stand die Höhe des Anteils auch auf dem Gewährschein, den der Anteilseigner als Nachweis für seinen Kuxbesitz erhielt.

Bei einer Taxierung von 60 Talern pro

Kux, wie sie im Ausbeutbogen für Crucis 1750 nachzulesen ist, wäre die Wertangabe für den Bachschen Anteil mit 67 Talern und zwölf Groschen korrekt gewesen. Mehr als sieben Taler blieben unbeachtet. Diese hätten ungefähr dem Wert eines Wäscheschranks (2 Taler), eines Kleiderschranks (2 Taler), 12 lederbezogener Stühle (2 Taler) und einer großen Zinnschüssel (1 Taler, 8 Groschen) entsprochen, wie sie im Bachschen Nachlass



Abb. 8: Detail des von Felix Mendelssohn Bartholdy 1843 gestifteten und damit ältesten Bach-Denkmal der Welt

verzeichnet sind. Aber, wie schon mehrfach erwähnt, handelte es sich hier nicht um einen Handelswert. Sicher war man sich dessen auch in Leipzig bewusst. Es wäre aber wohl kaum möglich gewesen, in der Aufstellung dem Bergwerksanteil keinen Wert zuzugestehen, denn damit hätte man der Einschätzung des Bergamts widersprochen.

Es ist auffällig, dass im Nachlassverzeichnis neben dem gesamten Bestand an Noten, der aber nachweislich verteilt wurde, auch andere Gegenstände fehlen, die offensichtlich schon vorher einen neuen Besitzer erhielten. So kann der dort aufgeführte Bestand wohl nur als ein Teil des gesamten Bachschen Eigentums angesehen werden.

Von dem im Nachlassverzeichnis aufgeführten Besitz erhielt Anna Magdalena $\frac{1}{3}$, die neun Kinder teilten sich die $\frac{2}{3}$. Für einige Gegenstände aus dem

Nachlass wurde ein Verkauf vereinbart. Das Geld sollte dann entsprechend unter den Erben verteilt werden. Für den Berganteil legte man fest, dass er gemeinschaftliches Eigentum bleiben sollte und damit war die Wertangabe unerheblich. Die Zubezahlungen wurden geregelt. Anna Magdalena war verantwortlich für die Zahlungen und sollte davon $\frac{1}{3}$, die restlichen Erben $\frac{2}{3}$ tragen.

Am 8. Juli 1750, knapp drei Wochen vor Bachs Tod, hatte man die Höhe der geforderten Zuzahlung für das dritte Quartal 1750 bekanntgegeben. In den nächsten vier Wochen wurden die Beträge eingesammelt. Bach war zu diesem Zeitpunkt durch die zwei Operationen sehr geschwächt und erlitt um den 18. Juli 1750 einen Schlaganfall. Diese Zuzahlung blieb er schuldig. Vor der endgültigen Verteilung des Erbes war noch einmal ein Quartal verstrichen und so Schulden für ein halbes Jahr aufgelaufen. Diese und die fällige Zuzahlung bezahlten die Erben. Im nächsten Quartal wurden erneut Retardatkuxe verstärkt vergewerkshaftet und der Bachsche Bergwerksanteil auf $1\frac{1}{4}$ Kuxe erhöht. Doch die Erben stellten nun die Unterstützung des Ursula-Erbstollens ein, der Anteil wurde Reminiscere 1752 im Retardat verstanden und fiel wieder an das Bergwerk zurück. Zu diesem Zeitpunkt gab es Gewerken, die Schulden von bis zu 13 Quartalen

hatten und deren Anteile trotzdem nicht im Retardat verstanden wurden. Es ist also davon auszugehen, dass die Erben signalisierten, die Zeche nicht mehr mitfinanzieren zu wollen.

Sie hatten ein langjähriges Engagement des Vaters bzw. Ehemanns zu einem ehrbaren, vielleicht kann man auch sagen, harmonischen Abschluss gebracht. Dass sich daran auch die Witwe beteiligte, zeigt, dass sie sich finanziell gut genug abgesichert sah, um sich das leisten zu können. Man hat den Eindruck, dass ein solches Vorgehen bereits bei der Erbteilung vereinbart wurde. So brauchte man nur eine kurzfristige Regelung. Es wurde keine Vereinbarung getroffen, wie mit Gewinnen umzugehen wäre, die zumindest langfristig nicht grundsätzlich auszuschließen waren. Über einen längeren Zeitraum wäre für Anna Magdalena Bach wohl auch ein

ständiges Einfordern von $\frac{2}{3}$ der Zubeße bei den anderen Erben, die zum Teil in Bückeburg, Berlin, Halle/Saale bzw. in Naumburg wohnten, schwer praktikabel gewesen.

Auch diese Entwicklung zeigt, dass der Bergwerksanteil im Bachschen Nachlass für die Erben keinen finanziellen Wert darstellte und die 60 Taler für den Kux gewöhnlich fehlinterpretiert werden. Bachs Besitz war zum Zeitpunkt der Erbteilung mit Schulden in Höhe von 2 Talern und 6 Groschen verbunden, die im Zechenregister Luciae 1750 des Ursula-Erbstollens namentlich aufgeführt sind.

Ab 1751 war die Silbergewinnung beim Ursula-Erbstollen erneut rückläufig. Reminiscere 1757 stellte das Bergwerk seinen Betrieb ein. Die Anteilseigner waren nicht mehr bereit, die erforderlichen finanziellen Mittel für dessen etwaige Weiterführung zur Verfügung zu stellen. Ende 1758 nahm diese Zeche den Betrieb mit einer neuen Gewerkschaft aber wieder auf. Noch 1852 wurde in einer Bergwerkszeitung der weitere Betrieb dieser Zeche als wünschenswert bezeichnet, da der Silbergehalt des dortigen Erzes relativ hoch war.

Heute weiß man, dass der Ursula-Erbstollen auf Grund der geologisch/lagerstättenkundlichen Situation keine Chance hatte, hohe Gewinne zu erwirtschaften. Dieses Wissen hatte man damals noch nicht.

Es ist nahezu unmöglich, die damaligen Geldbeträge in unsere heutige Wäh-

rung umzurechnen, aber an dieser Stelle seien einige Vergleiche angeführt: Bach hat für den Ursula-Erbstollen in sieben Jahren ungefähr 30 Taler an Zubeßzahlungen geleistet. Sein Jahreseinkommen gab er 1730 mit rund 700 Talern an. Das Gehalt des Kapellmeisters Johann Adolf Hasse am Dresdner Hof belief sich für das Jahr 1756 auf 3.000 Taler. Im Bachschen Nachlass wurde das wertvollste Cembalo aus seinem Besitz, ein „*fourniert Clavecin, welches bey der Familie, so viel möglich bleiben soll*“, auf 80 Taler geschätzt, eine Stainerische Geige mit 8 Talern taxiert.

Obwohl die Lebenshaltungskosten in Leipzig deutlich höher lagen als in den ländlichen Gegenden des Erzgebirges und sich Bachs Tätigkeit nicht mit der eines Bergmanns vergleichen lässt, sei an dieser Stelle angefügt, dass ein qualifizierter Häuer im Ursula-Erbstollen einen Taler und drei Groschen pro Woche als Lohn erhielt. Wenn er zwölf Monate angestellt blieb, was auf Grund der stark schwankenden Belegschaftsgröße dieser Zeche oft nicht der Fall war, kam er auf ein Jahreseinkommen von knapp 60 Talern. Mit der von Bach gezahlten Zubeße konnte ein solcher Bergmann ungefähr ein halbes Jahr lang bezahlt werden.

In der von Johann Nikolaus Forkel verfassten Bach-Biographie aus dem Jahr 1802 ist zu lesen: „*Außer den großen Verdiensten, welche Bach in der Kunst als vollendeter Spieler, Componist und Musiklehrer hatte, besaß er auch das Verdienst,*

ein vorzüglich guter Hausvater, Freund und Staatsbürger gewesen zu sein.“ Die im Bergarchiv Freiberg neu entdeckten Schriftstücke sind eine wertvolle Ergänzung zu den wenigen bisher bekannten Bach-Dokumenten, die über den letztgenannten Punkt Auskunft geben.

Bachs finanzielle Beteiligung am sächsischen Bergbau wäre wohl nicht vorstellbar, wenn er sich in seinen letzten Lebensjahren verbittert aus dem öffentlichen Leben zurückgezogen oder in finanziellen Nöten gelebt hätte. Die Triebfeder für sein finanzielles Engagement beim Ursula-Erbstollen muss eine Grundeinstellung gewesen sein, die im damaligen Sachsen sehr verbreitet war: Dem ehrbaren Bürger stand es gut an, als Kuxbesitzer mit der Zahlung von Zubeße den sächsischen Bergbau zu unterstützen und zu fördern. Dieses Engagement schloss natürlich das Hoffen auf Ausbeute nicht aus.

So dürften für Bachs Engagement beim Ursula-Erbstollen die Worte gegolten haben: „*Der Gewercke muss gute Hoffnung und Vertrauen zum Bergwerck haben, sonst wird er nicht glücklich seyn, und gedencken, was er giebt, als wenn er es armen Leuten gebe.*“ [Minerophilo, Bergwerks-Lexicon, Chemnitz 1743]

In der Zeit, in der Johann Sebastian Bach den Ursula-Erbstollen zu Kleinvoigtsberg mitfinanzierte, verdienten dort durchschnittlich zwölf Bergleute ihren Lebensunterhalt, und es wurden 76 Kilogramm Silber gewonnen.

Chronik 2014

925 Jahre – 1089

– Herrschaft der Wettiner beginnt im sächsisch-thüringischen Raum mit Heinrich I. von Eilenburg als Markgraf von Meißen

500 Jahre – 1514

– Beginn der zweiten Blütezeit des Freiburger Bergbaus

475 Jahre – 1539

– Einführung der Reformation im albertinischen Sachsen durch Herzog Heinrich den Frommen

450 Jahre – 1564

– (09.06.) Hans Röhling in Freiberg gestorben, 1545 Berufung zum ersten Bergamtsverwalter, damit Beginn des allmählichen Aufbaus einer mittleren Bergverwaltung im albertinischen Sachsen

425 Jahre – 1589

– Neue Bergordnung durch Kurfürst Christian I. erlassen, bleibt bis ins 19. Jahrhundert weitgehend gültig

300 Jahre – 1714

– Weihe der von Gottfried Silbermann erbauten großen Orgel im Freiburger Dom (Baubeginn 1711)
– (03.03.) Hannß Carl von Carlowitz gestorben, der Freiburger Oberberghauptmann begründet mit seinem Werk „*Sylvicultura oeconomica oder hauswirthliche Anleitung zur Baumzucht ...*“ in der Forstwirtschaft das Nachhaltigkeitsprinzip zur dauerhaften Versorgung mit Brennmaterialien im Montanwesen

275 Jahre – 1739

– Johann Gottlieb Kern, Edelsteininspektor und Vorsteher des Halsbrückner Reviers bei Freiberg, unterrichtet in Freiberg Bergbaukunde, Verfasser des „*Bericht vom Bergbau*“
– (25.07.) Ankunft von Michail W. Lomonossow in Freiberg; der russische Universalgelehrte erhielt bei Bergrat Johann Friedrich Henckel bis Mai 1740 eine metallurgische Ausbildung und war sein berühmtester Schüler

250 Jahre – 1764

– (02.04.) Ernst Friedrich von Schlotheim geboren, Student 1791/93, 1817–1828 Präsident des Kammerkollegiums in Gotha, Begründer der Paläobotanik

– (30.11.) Georg Adolph Freiherr von Gutschmid geboren, Student 1779/80, 1806–1821 Berghauptmann, 1819–1821 Leiter des Oberbergamts Freiberg

225 Jahre – 1789

– Fertigstellung des Churprinzer Bergwerkskanals mit einem Kahnbehaus (gilt als das erste Schiffshebewerk der Welt) für den Erztransport von der Grube „*Churprinz*“ bei Großschirma zur Hütte Halsbrücke, erbaut durch Kunstmeister Johann Friedrich Mende, Student 1767/69

200 Jahre – 1814

– Gründung der Werner-Stiftung aus dem Erlös der vom sächsischen Staat für die Bergakademie in wesentlichen Teilen erworbenen privaten Sammlungen von Abraham Gottlob Werner
– (Januar) Carl Gottlieb Mehner gestorben, Student 1789/83, Schichtmeister in Freiberg, 1795–1812 Unterricht über Schichtmeisterverrichtungen und ab 1802 auch über Registerwesen an der Bergakademie
– (20.04.) Friedrich Moritz Ihle geboren, Student 1831/34, Oberhüttenverwalter in Freiberg, führte mehrere neue Verfahren ein, so für die Produktion von Zink und Kupfervitriol

175 Jahre – 1839

- (14.01.) Kurt Merbach geboren, Student 1856/61, Oberhüttenamtsdirektor in Freiberg, veranlasste den Bau der ersten Schwefelsäurefabrik auf der Basis des Verfahrens von Clemens Winkler und 1889 den Bau der Halsbrücker Esse, 1902 Ehrenbürger der Stadt Freiberg, Straße im Campus nach ihm benannt
- (04.02.) Heinrich Ludwig Lattermann gestorben, Student 1796/99, Besitzer der Hammerwerke Morgenröthe, Rautenkranz und Tannenbergs- thal im Vogtland, Bergkommissionsrat und langjähriges Mitglied der sächsischen Ständekammer
- (28.04.) Karl Haushofer geboren, Student 1859/ 1861, Professor für Mineralogie am Polytechni- kum bzw. an der TH München, ab 1889 deren Direktor
- (26.05.) Theodor Kellerbauer geboren, Student 1857/61, Professor für Maschinenkunde an der Gewerbeschule Chemnitz
- (03.06.) Hermann Spamer geboren, Student 1861/63, Technischer Direktor der Ilseder Hütte in Groß Ilsede bei Peine, Namensgeber der 2005 gegründeten „Hermann-Spamer-Stiftung“
- (04.06.) Eckley Brinton Coxe geboren, Student 1862/64, Gründer und Präsident des American Institute of Mining Engineers
- (29.09.) Carl Friedrich Mohs gestorben, Student 1798/1801, 1818-1826 Professor für Mineralo- gie, danach an der Universität Wien
- (28.10.) Theodor Erhard geboren, Student 1858/63, 1868-1912 Dozent, ab 1875 Professor für Physik und ab 1881 für Elektrotechnik, 1907-1909 Rektor, 1906-1916 nebenamtlich Lei- ter der Bibliothek der Bergakademie
- (31.12.) Franz Werner Wilhelm von Veltheim ge- storben, Student 1805/07, 1810 Oberbergmeis- ter in Eisleben, 1816 Berghauptmann in Halle, 1835 Oberberghauptmann in Berlin

150 Jahre – 1864

- (23.02.) Waldemar Scheidhauer geboren, 1923 Ehrendoktor, Generaldirektor der Werschen- Weißenfelder Braunkohlen AG, Halle
- (04.03.) Louis Fadó geboren, Student 1882/84, 1921 Ehrendoktor, Direktor der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt (Degussa), Frankfurt a. Main
- (15.03.) Georg Wilhelm Albert Borchers gebo- ren, Student 1884/88, 1924-1929 als Berghaupt- mann Leitung des Oberbergamts Freiberg
- (03.07.) Fritz Michel geboren, Student 1885/89, Chemiker bei der Allgemeinen Gold- und Silber- scheide-Anstalt Pforzheim, 1910/34 Direktor der dortigen Staatlichen Probieranstalt für Baden
- (11.07.) Georg Alfred Wiede geboren, Student 1882/85, 1921 Ehrendoktor der Bergakademie, Bergrat, 1916 Errichtung einer „Alfred-Wiede- Stiftung für Forschungszwecke“
- (16.08.) Wilhelm Bentrop geboren, 1928 Ehren- doktor, Bergwerksdirektor der Zeche Neumühl
- (19.08.) Richard Lippmann geboren, Student 1886/88, 1926 Ehrendoktor, Direktor des Eisen- werks Gröditz
- (31.08.) Alexander Zenzes geboren, Student 1885/89, Hütteningenieur bei Krupp, Leiter einer Stahlgießerei in Chemnitz, Bau von Hüt- tenanlagen als selbstständiger Unternehmer, Entwicklung eines Verfahrens der Klein-Besse- merei (Zenzes'scher Kleinkonverter)
- (05.10.) August Werner Freiherr von Hövel ge- storben, Student um 1830, 1851 Direktor des

- Märkischen Bergamts in Bochum, 1857 Ober- berghauptmann in Halle sowie 1864 in Bonn
- (08.10.) Karl Heinrich Balthasar geboren, Stu- dent 1886/90, Bergdirektor der Richard-Hart- mann-Schächte bei Teplitz, Vorsitzender des Direktoriums der Deutschen Bergschule in Dux
- (07.11.) Johann Barthold Mühlenpfordt ges- torben, Student 1811/12, Kunstmeister und Ma- schinendirektor in Clausthal

125 Jahre – 1889

- „Hohe Esse“ der Hütte Halsbrücke in Betrieb ge- nommen, damals mit 140 m der höchste Schorn- stein der Welt
- Fertigstellung des Hauptgebäudes der Reichs- post in Freiberg (heute Platz der Oktoberopfer 1)
- (07.02.) Carl Beck (Sohn von Professor Richard Beck) geboren, 1946-1948 Dezernent des Amtes für Volksbildung in Freiberg, Stadtrat, 1952- 1957 erster Dozent für Deutsche Sprache und Literatur an der Bergakademie und 1952/53 Leiter des neugebildeten Lektorats für Deutsch
- (17.02.) Georg Heinrich Louis Haniel gestorben, Student 1837/39, 1873 Mitbegründer der Firma Haniel und Lueg, Düsseldorf
- (19.03.) Carl Friedrich Ebert gestorben, Student 1855/60, Mitgründer und Direktor des Stein- kohlenwerks Florian Kästner & Co., Reinsdorf bei Zwickau
- (12.04.) Hermann Schwanecke geboren, 1949- 1956 Professor für Geologie, Institutsdirektor
- (29.05.) Carl Stephan geboren, Student 1912/16, 1929-1942 Lehraufträge „Übungen mit Gas- schutzgeräten“ sowie ab 1939 „Grubenrettungs- wesen“ an der Bergakademie, ab 1924 Leiter der Bergschule Borna
- (07.12.) Hugo Weber geboren, 1930 Ehrendo- ktor, 1927-1930 Sächsischer Staatsminister der Finanzen, Dresden

100 Jahre – 1914

- (04.05.) Manuel Ortigosa gestorben, Student 1841/45, Bergdirektor in Sevilla
- (09.05.) Willi Lindenlaub geboren, 1982 Ehren- senator, 1962-1969 Professor für Organisation und Planung der NE-Metallindustrie, 1969- 1979 Professor für Sozialistische Betriebswirt- schaft (Grundmittelwirtschaft der Industrie)
- (03.07.) Helmut Kegel (Sohn von Professor Karl Kegel) geboren, Student 1938/39, Hauptge- schäftsführer und Vorstandsmitglied im Verein Deutscher Eisenhüttenleute
- (10.07.) Gustav Zouhar geboren, 1961-1975 Pro- fessor für Spangebende Formung, ab 1969 für Hüttenmaschinenteknik
- (19.07.) Joseph Czikel geboren, 1952-1966 Pro- fessor für Gießereikunde und Institutsdirektor
- (30.10.) Friedrich Ludwig Rudolf Kohlrausch ge- storben (gefallen), 1913-1914 a.o. Professor für Radiumkunde und Direktor des neugegründe- ten Radium-Instituts
- (10.11.) Ödön Alliquander geboren, 1976 Ehren- doktor, Professor für Bohrtechnik, TU Miskolc
- (14.11.) Yekutiel X. Federmann geboren, 1996 Ehrendoktor, erfolgreicher israelischer Privat- unternehmer, Investor der Firma „Freiberger Compound Materials GmbH“ (FCM)
- (24.12.) Inbetriebnahme des Kavernenkraft- werks im „Dreibrüderschacht“ bei Freiberg

75 Jahre – 1939

- (01.01.) Gründung der Grubenrettungsstelle Freiberg; diese wird der Versuchsstrecke auf

- der Reichen Zeche angegliedert und für die Aus- bildung der Studenten mitbenutzt
- (14.01.) Carl Heinrich Fischer gestorben, Stu- dent 1878/83, 1921 Ehrendoktor, 1908 Vortra- gender Rat im Sächsischen Finanzministerium, 1921 Geheimer Rat, sächsischer Oberberghaupt- mann und Dirigent der zweiten Abteilung des Finanzministeriums
- (18.01.) Franz Kögler gestorben (Selbstmord), 1918-1939 Professor für Technische Mechanik und Baukunde, 1928-1930 Rektor Bergakademie
- (03.03.) Werner Hofmann gestorben, 1924 Eh- rensenator, 1929 Ehrendoktor, Direktor der Por- zellanfabrik Freiberg, Schatzmeister der Gesell- schaft der Freunde der Bergakademie
- (13.03.) Paul Wilski gestorben, 1905-1919 Pro- fessor für Geodäsie und Markscheidekunde
- (15.03.) Genehmigung zur Verleihung des Titels Dr. rer. nat.; als erster erwarb diesen Diplom- Chemiker Heinz Lange am 22.11.1939
- (08.07.) Grundsteinlegung zum Bau einer Ofen- halle für halbtechnische Untersuchungen an der Leipziger Straße (heute zum Gellert-Bau)
- (09.09.) Hans Madel gestorben (gefallen), Stu- dent 1907/11, 1924-1939 Professor für Aufbe- reitungs- und Bergbaukunde
- (05.11.) Carl Wurst gestorben, Student 1881/87, Bergdirektor, Vorstandsmitglied der A.G. Stein- kohlenwerke Vereinsglück Oelsnitz/Erzgebirge

50 Jahre – 1964

- (13.01.) Walter Ehrenreich Tröger gestorben, Student 1921/25, Professor für Mineralogie an TH Darmstadt sowie Universität Freiburg/Br.
- (18.01.) Eugen Fischer-Baling gestorben, 1946- 1948 Honorarprofessor für Politik und Philoso- phie, 1928-1945 Direktor der Reichsbibliothek Berlin
- (05.09.) Dieter Rüdiger gestorben (Selbstmord), 1956-1964 Professor für Technische Mechanik
- (27.09.) Kurt Pietzsch gestorben, 1959 Ehren- doktor, 1932-1945 Honorarprofessor für Geo- logie von Sachsen an der Universität Leipzig, 1947-1958 Chefgeologe der Außenstelle Frei- berg des Geologischen Dienstes der DDR, 1950- 1960 Lehrbeauftragter für „Regionale Geologie“ an der Bergakademie

25 Jahre – 1989

- Helmut-Erich-Rammler-Preis gestiftet
- (04.03.) Wolfgang Burkhardt gestorben, 1959- 1965 Professor für Experimentalphysik und Di- rektor des II. Physikalischen Instituts
- (28.03.) Otto Fleischer gestorben, 1950-1952 Professor für Kohlenbergbau und Bergwirt- schaftslehre, Institutsdirektor, Verhaftung 1952, 1953 politischer Prozess gegen ihn, langjährige Haftstrafe, 1991 posthume Rehabilitierung
- (18.04.) Rolf Müller gestorben, 1978 Ehrendo- ktor, Technischer Direktor im VEB Schwerma- schinenbau Lauchhammer
- (21.09.) Johannes Bahr gestorben, 1954-1971 Professor für Bergbaumaschinen und bis 1968 Institutsdirektor
- (09.11.) Fall der Berliner Mauer und friedliche Revolution, Hochschulerneruerung an der Berg- akademie
- (18.11.) Heinz Neuber gestorben, 1962 Ehren- doktor, 1950/51 Lehrauftrag für Technische Mechanik an der Bergakademie, 1946 Professor für Technische Mechanik an der TH Dresden, ab 1955 an der TH München

■ Roland Volkmer, Norman Pohl

Kandidaten der Dekanwahlen mit Mehrheit angenommen



Fotos (6): TU Bergakademie Freiberg

Die neuen Dekane der TU Bergakademie Freiberg: Prof. Bernhard Jung, Prof. Michael Schlömann, Prof. Carsten Drebenstedt (obere Reihe von links nach rechts), Prof. Alfons Ams, Prof. Horst Biermann und Prof. Carsten Felden (untere Reihe von links nach rechts)

Die Wahlen am 31. Januar brachten an vier der sechs Freiburger Fakultäten neue Personen auf die Position des Dekans. Nur an den Fakultäten für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik sowie für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie bleiben weiterhin Prof. Alfons Ams und Prof. Horst Biermann im Amt.

Alle vorgeschlagenen Kandidaten erhielten überwältigende Mehrheiten. An

der Spitze der Fakultät für Mathematik und Informatik steht ab April Prof. Bernhard Jung. Er ist seit Oktober 2005 Professor für Virtuelle Realität und Multimedia, seit April 2010 auch Mitglied des Senats der TU Bergakademie Freiberg. Erfahrungen als Dekan der Fakultät für Chemie und Physik konnte Prof. Michael Schlömann – Professor für Umweltmikrobiologie – bereits während seiner ersten Amtszeit von April bis August 2006 sammeln, bevor er im September desselben Jahres auf die Position des Prorektors für Bildung wechselte. Neuer Dekan der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau ist Prof. Carsten Drebenstedt, Professor für Bergbau/



Prof. Silvia Rogler ist neue Prorektorin für Bildung

Der Senat der TU Bergakademie Freiberg hat am 22. Januar eine weitere Prorektorin gewählt. Silvia Rogler verstärkt ab dem 1. Februar 2013 das Rektorat der Ressourcenuniversität. Die Professorin für Rechnungswesen und Controlling übernahm Aufgaben aus dem Bereich Bildung. Der bisherige Prorektor für Bildung, Prof. Dirk Meyer, wird sich nunmehr vor allem der strukturellen Entwicklung der Freiburger Universität widmen. Prof. Silvia Rogler ist seit dem Wintersemester 1999/2000 an der Freiburger Universität. Zuvor promovierte und habilitierte sie an der Georg-August-Universität Göttingen, an der sie auch ihr Studium in Betriebswirtschaftslehre absolvierte.

Tagebau am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Nach der Wahl von Prof. Silvia Rogler zur Prorektorin für Bildung übernimmt nun Prof. Carsten Felden das Amt des Dekans an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften. Seit April 2007 ist er Professor für Wirtschaftsinformatik und Informationswirtschaft an der Bergakademie.

TU Bergakademie nimmt Kurt Biedenkopf und Karl-Ulrich Köhler in den Hochschulrat auf

Der ehemalige Sächsische Ministerpräsident, Prof. Kurt Biedenkopf, ist neues Mitglied des Freiburger Hochschulrats. Die Sächsische Wissenschaftsministerin Prof. Sabine von Schorlemer hat am 28. Januar, auf Vorschlag der TU Bergakademie Freiberg den ehemaligen Sächsischen Ministerpräsidenten, Prof. Kurt Biedenkopf, und den Geschäftsführenden Vorstand von Tata Steel Europe, Prof. Karl-Ulrich Köhler, in den Hochschulrat der Ressourcenuniversität berufen. Dass sich die TU seit den 1990er-Jahren als Universität so erfolgreich entwickeln konnte, verdanke sie ganz wesentlich Kurt Biedenkopf, erklärte der Rektor der Ressourcenuniversität, Prof. Bernd Meyer. Einen großen Erfahrungsschatz als Industriemanager bringt Prof. Karl-Ulrich Köhler mit. Seit Oktober 2010 leitet er als Geschäftsführender Vorstand den zweitgrößten europäischen Stahlhersteller Tata Steel Europe.



Foto: TU Bergakademie Freiberg/Eckardt, Müller

Heisenberg-Professor will weiteres Forschungsfeld an der Bergakademie etablieren



Fotos (6): TU Bergakademie Freiberg

Unter dem Porträt Alexander von Humboldts überreicht Rektor Prof. Bernd Meyer (rechts) die Berufungsurkunde an Prof. Hermann Ehrlich.

Der Rektor der TU Bergakademie Freiberg, Prof. Bernd Meyer, berief am 25. Juli, Dr. Hermann Ehrlich zum Professor für Biomineralogie und Extreme Biomimetik. Damit konnte sich an der Ressourcenuniversität eine Heisenberg-Professur etablieren. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) verleiht diesen Titel speziell an Kandidaten, die an Universitäten ein neues Forschungsgebiet erschließen. Prof. Ehrlich will die Biomimetik – die Forschung, die aus natürlichen Phänomenen Rückschlüsse auf Wege für technische Innovationen zieht – mit den an der Bergakademie etablierten Feldern der Werkstoffwissenschaft, der Festkörperphysik und der Chemie verbinden. Ziel ist es, Biomaterialien zu entwickeln, die u. a. beständig gegen extreme Temperatur- und Druckbedingungen sind. Generell wird versucht, Konstruktions- und Funktionsprinzipien, die sich in der Natur bewährt haben, auf das Feld technischer Innovationen zu übertragen. Aufbauend auf solcher Forschung, will der Freiburger Wissenschaftler außerdem den internationalen Masterstudiengang „Biomineralogy and extreme Biomimetics“ an der Ressourcenuniversität einrichten. Prof. Hermann Ehrlich schloss seine Promotion im Jahr 1984 ab. Anschließend war er als Forscher für das Max-Bergmann-Zentrum für Biomaterialien und das Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden tätig. Nach der Habilitation im Fach Biomaterialien an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel übernahm Prof. Hermann Ehrlich die Leitung der Gruppe Biomineralogie und Extreme Biomimetik am Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg.

Russischer Professor verstärkt internationales Profil der Bergakademie



Rektor Prof. Bernd Meyer überreicht die Berufungsurkunde an Prof. Serguei Molodtsov, der früher selbst Humboldt-Stipendiat war.

Der Rektor der TU Bergakademie Freiberg, Prof. Bernd Meyer, berief am 30. April 2013 Dr. Serguei Molodtsov zum Professor für Strukturforschung mit XFELs- und Synchrotronstrahlung. Als wissenschaftlicher Direktor ist Prof. Molodtsov für den Aufbau des European XFEL (X-ray Free-Electron Laser) in Hamburg mitverantwortlich. Bei dem Projekt bauen zwölf europäische Länder in der Metropolregion Hamburg bis 2015 eine überwiegend unterirdische Forschungseinrichtung, mit der pro Sekunde bis zu 27.000 ultrakurze Laserlichtblitze im Röntgenbereich erzeugt werden können, deren Leuchtstärke herkömmliche Röntgenstrahlungsquellen milliardenfach übertrifft. Die Forscher und Studierenden der TU Bergakademie können künftig dank der Unterstützung durch Prof. Molodtsov das neue Feld der Materialcharakterisierung und auch -synthese mit dem XFEL aktiv mitgestalten. An der Freiburger Universität wird Molodtsov u. a. Lehrveranstaltungen zur Beeinflussung von Materialien unter der Wirkung von hochintensiven elektromagnetischen Feldern realisieren. Gerade auf dem Gebiet der Materialforschung sieht er viele Anknüpfungspunkte mit der Freiburger Physik. Bereits seit 1981 arbeitet der gebürtige Leningrader auf dem Gebiet der Festkörperphysik und der Materialforschung. Er beendete 1984 sein Physikstudium an der Staatlichen Universität Leningrad, um drei Jahre später seine Dissertation zu verteidigen. Im Jahr 1993 schloss er seine Habilitation ab. Als Privatdozent war Prof. Molodtsov ab 2000 an der TU Dresden tätig. Seit 2010 ist er wissenschaftlicher Direktor der European XFEL GmbH in Hamburg.

Neuer Mathematik-Professor sieht viele Anknüpfungspunkte an Ingenieurwissenschaften



Prof. Oliver Rheinbach (l.) nahm die Berufungsurkunde aus den Händen von Rektor Prof. Bernd Meyer entgegen.

Seit dem 1. April 2013 ist mit Oliver Rheinbach ein neuer Professor an der Fakultät für Mathematik und Informatik der TU Bergakademie Freiberg. Prof. Oliver Rheinbach, der zuvor u. a. an der Universität zu Köln und der TU Chemnitz gearbeitet hat, betreut nun das Fachgebiet des Wissenschaftlichen Rechnens am Institut für Numerische Mathematik und Optimierung. Forschungsgebiete sind u. a. die Modellierung und Simulation in der Biomechanik, etwa die Simulation von Arterien in Kooperation mit Medizinern und Ingenieuren. Ein Schwerpunkt seiner Arbeit liegt im parallelen wissenschaftlichen Rechnen, sprich: der schnellen Simulation auf Hochleistungsrechnern. Rheinbach beschäftigt sich mit der Numerik partieller Differentialgleichungen – insbesondere mit Gebietszerlegungsverfahren. Der neue Professor für Wissenschaftliches Rechnen will die Studenten der Bergakademie für das „interessante und hochinterdisziplinäre Umfeld von paralleler Simulation und High Performance Computing“ begeistern. In der Nähe von Düsseldorf geboren, studierte Rheinbach nach seiner Schulausbildung in Deutschland, Saudi-Arabien und Kanada an der Universität zu Köln und der McGill Universität in Montréal, Kanada. Nach seinen Diplomabschlüssen als Mathematiker und Wirtschaftsinformatiker wechselte er an die Universität Essen, später Universität Duisburg-Essen, wo er im Jahr 2006 über schnelle Löser für Finite-Elemente-Probleme promovierte. Bis zum Jahr 2011 arbeitete Rheinbach weiter an der Universität Duisburg-Essen. Zu Forschungsaufenthalten hielt er sich dabei immer wieder in den USA auf.

Professor für Aufbereitungs- maschinen will für den Ingenieurberuf begeistern



Aus den Händen von Rektor Prof. Bernd Meyer (l.) erhielt Holger Lieberwirth seine Berufungsurkunde als Professor der Bergakademie.

Zum 1. März 2013 hat die TU Bergakademie Freiberg einen neuen Professor für Aufbereitungsmaschinen und Direktor für das gleichnamige Institut bekommen: Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth. Das Institut für Aufbereitungsmaschinen beschäftigt sich unter anderem mit der Konstruktion von Maschinen zum Fördern und Sortieren von Primär- und Sekundärrohstoffen. Lieberwirth hat seine bisherige berufliche Laufbahn in einschlägigen Unternehmen bestritten und wechselt nun zurück zur Wissenschaft. 1962 in Dresden geboren, studierte er Maschinenbau an der TU Dresden und an der Hochschule für Bauwesen in Kiew (Ukraine). 1989 promovierte er in Dresden mit seiner Forschungsarbeit zur „Gewinnbarkeit spröden, intensiv geklüfteten Festgesteins mittels Schaufelradbagger“. Danach war Lieberwirth in mehreren Unternehmen der Aufbereitungsbranche beschäftigt, darunter in leitender Funktion bei der Krupp Fördertechnik GmbH. Zuletzt arbeitete er bei der TAKRAF GmbH in Leipzig, einem weltweit tätigen Unternehmen für Tagebaugeräte, als Geschäftsführer des Vertriebs und als CEO für den asiatischen Markt. Der neue Professor will seine Begeisterung für das Fach und den Standort Freiberg, aber auch seine Erfahrungen aus 25 Berufsjahren an die Studenten weiter geben. In der Forschung will Lieberwirth an seinem Institut die Entwicklung energieeffizienter, verschleißoptimierter und wartungsfreundlicher Aufbereitungsmaschinen zum Zerkleinern, Klassieren, Mischen und Agglomerieren in Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Bereichen voranbringen.

Juniorprofessor für Chemie ab September an der TU Bergakademie Freiberg



Prof. Silvia Rogler, Prorektorin für Bildung, überreicht Dr. Gero Frisch die Berufungsurkunde zum Juniorprofessor.

Seit dem 1. September 2013 ist Dr. Gero Frisch neuer Juniorprofessor am Institut für Anorganische Chemie der Fakultät für Chemie und Physik an der TU Bergakademie Freiberg. Jun.-Prof. Frisch war bisher an der Universität in Freiburg sowie an der University of Leicester in England tätig. An der Ressourcenuniversität möchte er nun in der Forschung durch den Aufbau einer eigenen Arbeitsgruppe seine Aktivitäten auf den Bereich der Erzverarbeitung ausweiten und auch in die Lehre einbringen. An einer Tätigkeit an der Bergakademie gereizt hat Jun.-Prof. Frisch vor allem das ideale Forschungsumfeld mit der Nähe zum Helmholtz-Institut für Ressourcentechnologie, aber auch der Status der Bergakademie als Ressourcenuniversität. Daher plant der 36-Jährige den Aufbau einer Arbeitsgruppe, die an der Schnittstelle zwischen anorganischer Ressourcenchemie, Materialwissenschaften und Eigenschaften von ionischen Flüssigkeiten bzw. Salzschnmelzen agiert.

Der gebürtige Wiener studierte an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg. Nach seinem Diplomabschluss als Chemiker promovierte er auf dem Gebiet Festkörperchemie – in seiner Promotion untersuchte er die Strukturchemie von oxidischen Eisenverbindungen der Alkalimetalle. Im Jahr 2007 wechselte er an die University of Leicester und erforschte hier die Eigenschaften sowie Anwendungsmöglichkeiten ionischer Flüssigkeiten (organische Salze, die bei weniger als 100 Grad Celsius schmelzen). Er versuchte, die erarbeiteten Grundkonzepte auf das Recycling von Metallabfällen, Leiterplatinen, Magnete oder Halbleitermaterialien anzuwenden.

Recyclingexpertin für For- schung und Lehre in Freiberg mit gemeinsamer Berufung



Am 27. September erhielt Prof. Christiane Scharf ihre Berufungsurkunde von Prof. Bernd Meyer, Rektor der TU Bergakademie Freiberg.

Die Recyclingexpertin Prof. Christiane Scharf lehrt und forscht seit Beginn des Wintersemesters 2013 an der TU Bergakademie Freiberg und dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF). Es handelt sich um die erste gemeinsame Berufung von Bergakademie und Helmholtz-Institut. Prof. Christiane Scharf leitet seit dem 1. Oktober die Abteilung Metallurgie und Recycling des Helmholtz-Instituts Freiberg für Ressourcentechnologie. Sie wurde außerdem zur Professorin für Metallurgie und Recycling von Hochtechnologiemetallen an das Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinstoffe der TU Bergakademie Freiberg berufen. Im Mittelpunkt ihrer Forschung steht das Recycling von Materialien und Materialverbänden, wie Metallschrott, Elektronikschrott sowie Reststoffen, die bei der Gewinnung und Verarbeitung von Metallen anfallen. Dabei handelt es sich um Elemente wie Gold, Niob, Tantal, Rhenium, Magnesium, Seltenerdmetalle, Gallium, Indium, Germanium oder Platin. Neue Forschungsergebnisse will die Wissenschaftlerin unmittelbar in die Lehre einbringen und an die Studierenden der Ressourcenuniversität weitergeben.

Christiane Scharf studierte Chemieingenieurwesen in Burgsteinfurt und Clausthal. Sie war bisher am Institut für Metallurgie der Technischen Universität Clausthal tätig und untersuchte u. a., wie man Blei aus Reststoffen entfernen kann, um diese umweltverträglich weiterverarbeiten zu können, beispielsweise im Straßenbau. Außerdem ging es um die Aufbereitung von Reststoffen aus der Hüttenindustrie, die noch große Mengen an Eisen enthalten.

Ehrendoktorwürde an einen Pionier der Braunkohlenindustrie Mitteldeutschlands

Gottfried-Christoph Wild, Geschäftsführer der ROMONTA GmbH, erhielt am 16. November 2012, die Ehrendoktorwürde der TU Bergakademie Freiberg. Der Unternehmer und Vorsitzende des Beirats der Stiftung TU Bergakademie Freiberg nahm die Ehrung im Senatssaal im Hauptgebäude der Universität entgegen. Die Ressourcenuniversität würdigt mit der Auszeichnung die besonderen Verdienste Gottfried-Christoph Wilds bei der Entwicklung der Braunkohlenindustrie in Mitteldeutschland und sein vielfältiges Engagement

an der Bergakademie. Durch seine Arbeit bei ROMONTA hat sich eine enge Beziehung von Gottfried-Christoph Wild zur Bergakademie entwickelt. So richtete er die Stiftung der TU Bergakademie Freiberg seit deren Gründung vor 10 Jahren als Vorsitzender des Beirats auf die Förderung von Forschung und Lehre aus. Darüber hinaus gibt Wild sein Wissen als Lehrbeauftragter an die Studenten der Ressourcenuniversität weiter und unterstützt mit der ROMONTA GmbH die Ausbildung der Studenten durch die Vergabe und Betreuung von studentischen Arbeiten und Praktika.



Gottfried-Christoph Wild (m.) erhält die Ehrendoktorwürde von Rektor Prof. Meyer (r.) und Prof. Drebenstedt, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (l.).

Zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Georg Unland

Birgit Seidel, Carsten Drebenstedt, Michael Schlömann

Am 14. November 2013 vollendete Prof. Dr. Georg Unland sein 60. Lebensjahr. International anerkannter Maschinenbauer, Professor an der TU Bergakademie Freiberg seit 1993, Rektor der Universität in den Jahren 2000 bis 2008, Sächsischer Staatsminister der Finanzen seit 2008 – das sind einige Stationen seines Lebens.

Georg Unland wurde am 14. November 1953 in Bocholt in Westfalen geboren. Nachdem er 1972 am Main-Taunus-Gymnasium in Hofheim sein Abitur abgelegt hatte, studierte er von 1972 bis 1976 an der TU Darmstadt Maschinenbau. 1980 folgte die Promotion in der Fachrichtung Maschinenbau. Von 1980 bis 1993 hatte Georg Unland verschiedene berufliche Positionen inne. So war er u.a. bei der Krupp Polysius AG in Neubeckum/Westfalen tätig, bevor er 1990 Geschäftsführer der amerikanischen Tochtergesellschaft des Unternehmens, der Polysius Corp. in Atlanta, USA, wurde. Georg Unland ist verheiratet und hat vier Kinder.

Im Jahr 1993 wurde er zum Ordentlichen Professor für Maschinenbau, Spezialisierung Aufbereitungsmaschinen, an die TU Bergakademie Freiberg berufen. Die Bergakademie war ihm seit seiner Kindheit ein Begriff. Schon sehr früh hatte er sich für Geologie und Mineralogie begeistert und war so auf die Freiburger Universität aufmerksam geworden. Freiberg schien ihm damals jedoch unerreichbar: auf der anderen Seite der Grenze, im Osten Deutschlands. So hatten bis zur Wende zunächst hauptsächlich Fachbücher sein Bild von der Bergakademie und seinen Eindruck von Freiberg als

der Ausbildungs- und Forschungsstätte für die Grundstoffindustrie geprägt.

Die Wiedervereinigung Deutschlands erlebte Georg Unland in den USA und war von den Ereignissen begeistert. Als er im Jahr 1991 auf Einladung des Aspen Instituts Berlin zu einer Veranstaltung zum Thema „German-American Relations in the New World Order“ mit einem Schwerpunkt „Political, Economical and Social Issues in the Five New Länder“ in Dresden weilte, ließ er es sich nicht nehmen, auch Freiberg zu besuchen. Daran, dass er bald in dieser Stadt leben und arbeiten würde, war in dem Moment noch nicht zu denken.

Im darauffolgenden Jahr las er in der Wochenzeitung DIE ZEIT die Ausschreibung einer Professur an der Bergakademie Freiberg. Er bewarb sich – ohne so richtig zu wissen, ob er tatsächlich bereit war, in den „Osten“ zu gehen, und ohne sich Chancen auszurechnen. Doch noch im selben Jahr wurde er zu Gesprächen und einem Vortrag an die Bergakademie eingeladen. Der Besuch in Freiberg verlief erfolgreich, und schon am 6. Oktober 1992 erhielt Georg Unland den Ruf auf die C4-Professur für „Maschinenbau II (Aufbereitungsmaschinen)“.

Die Entscheidung über die Annahme des Rufes war eine der bis dahin schwierigsten in seinem Leben. Sie bedeutete u. a. die Aufgabe einer erfolgreichen und ihn ausfüllenden Industrietätigkeit, den Umzug der Familie von den USA in den Osten Deutschlands – mit allen Konsequenzen: unsichere Wohnverhältnisse, Schulwechsel für die Kinder, neue, bescheidenere Arbeitsverhältnisse und so



Prof. Georg Unland als Rektor der TU Bergakademie Freiberg im Jahre 2006

weiter. Doch das weltweite Ansehen der Universität, die Möglichkeit, wissenschaftlich und vielseitiger als bisher arbeiten zu können sowie die Unterstützung seiner Frau veranlassten Georg Unland, den Ruf anzunehmen. Als er dann am 1. Oktober 1993 seine Tätigkeit in Freiberg begann, ging für ihn ein Traum in Erfüllung. Nun hatte er es außerdem geschafft, seine Begeisterung für die Geologie und Mineralogie mit seiner beruflichen Tätigkeit im Bereich des Maschinenbaus zu verbinden.

Zunächst dem Institut für Maschinenbau zugeordnet, gründete er im Jahr 1996 das Institut für Aufbereitungsmaschinen. Prof. Georg Unland ist ein

ausgewiesener Wissenschaftler auf dem gesamten Gebiet des Aufbereitungsmaschinenbaus. Besonderes Augenmerk legte er auf die Problematik der mathematisch-petrografischen Charakterisierung von mineralischen Rohstoffen zur besseren Dimensionierung von Zerkleinerungsmaschinen. Hierfür baute er an seinem Institut ein eigenes Gesteinslabor auf. Auf ihn geht außerdem der Neubau des Technologiezentrums (Aufbereitungsmaschinenhalle), die erste Großversuchshalle an der TU Bergakademie Freiberg nach 1989, zurück.

Georg Unland ist Autor zahlreicher Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften und -büchern wie u.a. ZKG-International, Aufbereitungstechnik, Cement-International, Minerals Engineering, International Journal of Mineral Processing oder dem Handbook of Powder Technology 12 (Particle Breakage). Er hielt Fachvorträge auf Tagungen und Kongressen in nahezu aller Welt. Darüber hinaus arbeitete er in mehreren fachlichen Gremien mit. So ist er u. a. Mitglied in der Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (GDMB) sowie im ProcessNet-Fachausschuss „Zerkleinern und Klassieren“. Besonders eng arbeitete er mit dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) zusammen.

Auf Initiative von Prof. Georg Unland wurde im Jahr 2006 durch Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus in Freiberg der „Freundes- und Förderkreis des Instituts für Aufbereitungsmaschinen“ gegründet, dessen Anliegen der Austausch zwischen Universität und Unternehmen, die Unterstützung der Universität in Forschung und Lehre sowie die Förderung der Ausbildung von Studenten und Doktoranden am Institut für Aufbereitungsmaschinen ist.

Prof. Georg Unland stiftete zudem die „Institutsmedaille“ – einen Preis, mit dem jährlich Wissenschaftler, die einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Fachgebiets Aufbereitungstechnik leisten und zur Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen der Industrie und dem Institut für Aufbereitungsmaschinen beitragen, geehrt werden.

Prof. Unland war – und ist – Betreuer von mehr als 20 Promotionsverfahren.

Als er am 3. Februar 2000 zum Rektor der TU Bergakademie Freiberg gewählt wurde, hatte Georg Unland gerade den Aufbau seines Instituts beendet. Am

1. April 2000 trat er sein neues Amt an. Zwei weitere Male wurde er in diesem Amt bestätigt, sodass er insgesamt acht Jahre lang die Geschicke der TU Bergakademie Freiberg lenkte. In dieser Zeit trug er wesentlich zur Entwicklung der Universität bei und setzte bedeutende Meilensteine für die Universität, aber auch für die Stadt Freiberg und die gesamte Region.

Gleich zu Beginn seiner ersten Amtszeit wurde die TU Bergakademie Freiberg mit massiven Stellenabbauplänen der sächsischen Staatsregierung konfrontiert. Bereits in den vorangegangenen Jahren hatte es an der Universität zahlreiche Veränderungen gegeben, sodass eigentlich einige Jahre der Konsolidierung angebracht gewesen wären. Aber das ungenügende Steueraufkommen in Sachsen (ein großer Teil des sächsischen Landeshaushalts wurde durch Transferzahlungen gedeckt), verbunden mit einem über dem Bundesniveau liegenden Anteil der öffentlichen Hand und der Aussicht auf einen Rückgang der Anzahl sächsischer Studenten aufgrund des drastischen Geburtenknicks in Sachsen, ließ das nicht zu.

Durch die sächsische Staatsregierung wurde eine sächsische Hochschulentwicklungskommission (SHEK) eingesetzt, um das Hochschulsystem des Freistaats zu analysieren und Empfehlungen zu seiner künftigen Struktur auszusprechen. Außer mit Personaleinsparplänen wurde die TU Bergakademie Freiberg auch mit anderen Ideen der SHEK und der sächsischen Staatsregierung konfrontiert, wie beispielsweise mit denen der Aufgabe von Wissenschaftsdisziplinen. Damit hätte zwar der geforderte Personalabbau realisiert werden können – zugleich wäre jedoch die Existenz der Universität gefährdet gewesen.

Mit strategischem Weitblick setzte sich Prof. Georg Unland damals – trotz der auferlegten Sparmaßnahmen und des zu realisierenden Personalabbaus – für den Erhalt des gesamten Fächerspektrums der Freiburger Universität, verbunden mit einer weiteren Profilierung der Universität, ein. Nach Analyse der Situation und Gesprächen mit jeder Fakultät erarbeitete das Rektoratskollegium ein langfristiges Entwicklungskonzept. Um die gesamte Komplexität des Freiberg-typischen Profils auch in Zukunft abdecken zu können, legte Prof. Georg Unland besonderen Wert auf eine starke Verflechtung innerhalb der Universi-

tät – d.h. darauf, dass sich alle Bereiche am Gesamtprofil orientieren und in dieses einordnen. So entstand bereits während seiner ersten Amtszeit mit dem sog. Profilierungs- und Umsetzungskonzept eine Matrix für eine langfristige, strategisch orientierte Weiterentwicklung der Freiburger Universität. Darin formulierte Prof. Georg Unland erstmals die vier thematischen Profillinien Geo, Werkstoff/Material, Energie und Umwelt.

Um den schmerzlichen Personalabbau im Konsens mit der Hochschule bei gleichzeitiger Wahrung des gesamten Fächerspektrums der Universität bewältigen zu können, erarbeitete das Rektoratskollegium in diesem Kontext ein „Verdichtungskonzept“, d. h. ein Ausstattungsmodell der Fakultäten. Dieses sah vor, durch vergrößerte Lehr- und Forschungsgebiete der Professoren bei gleichzeitiger Reduzierung von Redundanzen in Forschung und Lehre die Anzahl der Professuren zu vermindern und dennoch das volle wissenschaftliche Spektrum zu erhalten. Zugleich bot das Konzept die Möglichkeit, die personelle Ausstattung der (verbleibenden) Professuren zu erhalten oder sogar zu verbessern. Je nach Umfang der unausweichlichen Personalkürzungen konnte außerdem mehr oder weniger Raum für notwendige Profilabrundungen geschaffen werden. Stets stand dabei die Gleichbehandlung aller Fakultäten im Hinblick auf den Personalabbau im Vordergrund. Ziel war es, den Personalabbau proportional durch alle Fakultäten sowie die Verwaltung und die zentralen Einrichtungen – und ohne Entlassungen – zu realisieren. Dennoch war dieser Weg – anders als es beispielsweise bei Aufgabe von Wissenschaftsdisziplinen gewesen wäre – der konfliktreichste, da er sämtliche Bereiche der Universität betraf. Langfristig gesehen bot er jedoch die einzige Möglichkeit, die Bergakademie mit ihrem gesamten Profil als leistungsstarke Technische Universität mit einem hohen Niveau in Lehre und Forschung zu erhalten. Prof. Georg Unland scheute sich auch nicht vor schwierigen, teilweise unpopulären Entscheidungen.

Wie im Profilierungs- und Umsetzungskonzept formuliert, legte Prof. Unland großen Wert auf die interdisziplinäre Ausrichtung von Lehre und Forschung. Eine hohe Priorität hatte dabei die Initiierung neuer, fachübergreifender Forschungsprojekte, Graduiertenkollegs und Sonderforschungsbereiche. Nach-

dem es an der TU Bergakademie einige Jahre lang keine Großprojekte gegeben hatte, gelang es in den Folgejahren, mehrere interdisziplinäre Großforschungsprojekte nach Freiberg zu holen, darunter den DFG-Sonderforschungsbereich 799 „TRIP-MATRIX-COMPOSITE“, das Schwerpunktprogramm 1418 der DFG „Feuerfest-Initiative zur Reduzierung von Emissionen – FIRE“, das Zentrum für Innovationskompetenz „Virtual High Temperature Conversion – VIRTUHCON“ sowie das im Rahmen der Sächsischen Exzellenzinitiative bewilligte Spitzentechnologiecluster „Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch atomares Design und Defekt-Engineering“.

Charakteristisch für Prof. Georg Unland war auch sein Streben nach einer engen Verknüpfung mit Wirtschaftspartnern. Nicht nur an seinem eigenen Institut pflegte er deshalb enge Kontakte zur Industrie nach dem Leibnizschen Prinzip „Theoria cum praxi“. Während seiner Amtszeit wurde u. a. die Firmenkontaktbörse, die inzwischen jährlich parallel zum Tag der offenen Tür im Januar stattfindet, eingeführt. Darüber hinaus rief er im Jahr 2007 die „Kompetenzoffensive Nachhaltigkeit“ ins Leben, mit der talentierte Nachwuchswissenschaftler für Forschungsthemen an der TU Bergakademie Freiberg begeistert und gefördert werden sollten. Mehr als 70 Unternehmen, darunter die Siemens AG, die ThyssenKrupp AG, die Verbundnetz Gas AG und die Deutsche Solar AG, beteiligten sich an der Initiative und stellten u. a. Promotionsstipendien bereit.

Ein weiteres Zeichen der Anerkennung der Wirtschaft für die TU Bergakademie Freiberg war beispielsweise die „strategische Partnerschaft“, die die Siemens AG mit der Universität einging. 2007 wurde in Freiberg ein „Center for Knowledge Interchange“ (CKI) eingerichtet. Damit war die TU Bergakademie Freiberg eine von wenigen Hochschulen weltweit, an denen die Siemens AG aufgrund der hier angesiedelten hohen Forschungskompetenzen ein solches Zentrum gründete. Im gleichen Jahr avancierte die Bergakademie außerdem zur „ThyssenKrupp Schwerpunktuniversität“.

Ein weiterer Wunsch Prof. Unlands, der selbst viele Jahre im Ausland gelebt hatte, war es, das weltweite Ansehen der Bergakademie zu stärken. Neben der Kooperation mit sächsischen und nati-

onalen Hochschulen war ihm deshalb die Zusammenarbeit mit internationalen Partnern ein hohes Gebot. Er selbst war viele Jahre als Fulbright-Vertrauensdozent der TU Bergakademie Freiberg tätig. Parallel dazu versuchte er auch im internationalen Bereich, die Besonderheiten und Stärken der Universität zu nutzen und auszubauen: Sein spezielles Augenmerk richtete sich auf Partner in Osteuropa. Zu diesen hatte die Bergakademie bereits seit langem, teilweise seit Jahrhunderten, gute Kontakte. Diese zu aktivieren war ihm sehr wichtig. In Anerkennung seines diesbezüglichen Engagements wurde ihm im Jahr 2006 die Ehrendoktorwürde der Nationalen Bergbauuniversität der Ukraine in Dnepropetrovsk verliehen.

Besonderen Wert legte er auf eine Abstimmung mit internationalen Universitäten, deren Profil mit dem der TU Bergakademie Freiberg vergleichbar ist. Beispielsweise wurde im Jahr 2007 die International University of Resources (IUR) gegründet, an der neben der Freiburger Universität Montanuniversitäten aus St. Petersburg, Dnepropetrovsk, Leningrad und Kraków beteiligt sind. Inzwischen bietet die IUR u. a. den Master-Studiengang „Advanced Mineral Resources Development“ an.

Auch die Gründung des „Ständigen Deutsch-Russischen Rohstoff-Forums“ reicht in die Amtszeit von Prof. Georg Unland als Rektor der TU Bergakademie Freiberg zurück. In Anwesenheit des russischen Präsidenten Vladimir Putin und der deutschen Bundeskanzlerin Angela Merkel wurde dieses Forum am 10. Oktober 2006 durch das St. Petersburger Staatliche Bergbauinstitut und die TU Bergakademie Freiberg gegründet. Das Deutsch-Russische Rohstoff-Forum gilt heute als die bedeutendste Nichtregierungsorganisation im Rohstoffdialog mit Russland. Die Schirmherrschaft hat von der Gründung an der ehemalige Bundesumweltminister Prof. Klaus Töpfer inne. Seit 2007 finden im Rahmen dieses Forums u. a. jährliche Rohstoffkonferenzen – abwechselnd in Deutschland und in Russland – statt.

Die weitere Internationalisierung der Universität betrifft auch den Bereich der Lehre. Im Jahr 2002 wurde an der Bergakademie das erste internationale Promotionsprogramm „Environmental and Material Science, Technology, and Management“ etabliert. Dieses bildete später einen der wesentlichen Grund-

steine der im Jahr 2008 eingerichteten Graduierten- und Forschungsakademie (GraFA).

Bereits zu Beginn der Amtszeit von Prof. Georg Unland – im Jahr 2000 – war außerdem das Internationale Universitätszentrum „Alexander von Humboldt“ (IUZ) gegründet worden. Mit dieser strukturellen Maßnahme wurden die internationalen Kompetenzen an der Universität gebündelt.

Aktiv brachte er sich auch in die Entwicklung neuer Studienangebote ein. So stieß er die Entwicklung von Studiengängen unter Nutzung von Kernkompetenzen mehrerer Fakultäten an. Beispielsweise wurde die Einrichtung des Studiengangs „Fahrzeugbau: Werkstoffe und Komponenten“ unmittelbar durch Prof. Georg Unland angeregt. Auch der Gedanke der durch ihn „Bindestrich-Informatik“ (wie beispielsweise Geo-Informatik u. a.) genannten Studiengänge geht auf Prof. Unland zurück.

Überhaupt war das Augenmerk von Georg Unland stets auch auf die nachfolgenden Generationen gerichtet. Die Belange der Studenten nahm er sehr ernst und fand immer ein offenes Ohr für sie. Sowohl an seinem Institut als auch an der Universität widmete er der Betreuung „seiner“ Studenten und Promovenden viel Zeit.

Am Herzen lag ihm außerdem eine würdige Verabschiedung der Absolventen unserer Universität. So führte er eine jährliche Festveranstaltung zur Absolventenverabschiedung ein. Abgerundet wird die Veranstaltung durch den jeweils am gleichen Abend stattfindenden Universitätsball.

Wichtige Akzente setzte Prof. Unland zudem im Bereich der Alumni-Arbeit. Auf seine Amtszeit geht beispielsweise die Gründung des Freiburger Alumni-Netzwerks (FAN) zurück.

In seine Amtszeit fielen auch die Reform des Studiensystems im Rahmen des Bologna-Prozesses und damit verbunden die Modularisierung der Studiengänge. Mit der gebotenen Zurückhaltung und Skepsis stellte sich das Rektoratskollegium dieser Herausforderung. Dabei war die Hochschulleitung bemüht, diesen politisch gesteuerten Prozess zu nutzen, um an der Universität zu effektiveren Studienstrukturen und zu mehr Zeit für Spitzenforschung zu gelangen. Zugleich stand für das Rektoratskollegium insbesondere die Sicherung der Qualität in der Lehre im Vordergrund.

Eng verbunden mit dem Anspruch auf Qualität der Lehre und Forschung waren auch die Bemühungen von Prof. Georg Unland um die Schaffung der entsprechenden Rahmenbedingungen. Aus den USA zurückgekehrt, hatte er einen Einblick in die dortige Hochschul-landschaft mitgebracht (die er im Übrigen als durchaus differenziert wahrgenommen hatte). Für Freiberg sah er die Chance einer Campus-Universität im klassischen Sinne. Bereits 2001 entwickelte er ein Campus-Konzept und trat dazu mit den Gremien der Universität in den Dialog. Der Campus sollte „zu einer Anlage werden, in der Studenten und Wissenschaftler kreativ denken, arbeiten, wohnen und leben können“. Zudem wollte Prof. Unland die Kommunikation auch außerhalb der Gebäude fördern – durch Sportmöglichkeiten, Sitzgelegenheiten etc. Auch durch seine pflanzliche Gestaltung, die Beachtung ökologischer Aspekte sowie durch farbliche und architektonische Akzente sollte der Campus aufgewertet werden. Um eine ruhige und Kreativität fördernde Atmosphäre zu schaffen, setzte sich Unland zudem für ein neues Straßen- und Verkehrskonzept ein. Dabei hatte er nicht nur generelle, verkehrsberuhigende Maßnahmen im Auge, sondern auch die Vision der Verlegung oder Untertunnelung der unmittelbar durch den Campus führenden Bundesstraße.

Außer der Universität lag Prof. Georg Unland die Universitätsstadt Freiberg sehr am Herzen. Sein Interesse galt dabei der städtebaulichen Entwicklung. Hartnäckig setzte er sich für die Belebung der Innenstadt ein. In diesem Kontext ist nicht nur die Sanierung des Schlosses Freudenstein und des ehemaligen Amtshauses zu sehen. Auch der Gedanke des Schloßplatzquartiers für die Unterbringung der wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät und des Internationalen Universitätszentrums geht auf ihn zurück. Im Interesse der Stadt Freiberg forderte Rektor Unland zudem, dass neu berufene Professoren ihren Lebensmittelpunkt nach Freiberg bzw. in die Freiburger Region verlegen, d. h. mit ihren Familien vor Ort wohnen

und sich unmittelbar am Leben der Stadt beteiligen.

Er selbst hat dies aktiv gelebt. So initiierte er die Vergabe eines Kulturstipendiums, das gemeinsam von der Universität und dem Mittelsächsischen Theater an Studenten vergeben wird. Zugleich beteiligte er sich persönlich – gemeinsam mit anderen Professoren und Mitstreitern – an der Finanzierung desselben. Überhaupt lag ihm die Zusammenarbeit mit dem Theater sehr am Herzen. So fanden erstmals Konzerte direkt in den Räumlichkeiten der Universität statt. Auch für andere künstlerische Projekte war er offen. Schüler des Scholl-Gymnasiums beispielsweise durften an der Universität Kunstprojekte umsetzen.

Ausdruck der Bedeutung, die Prof.



Staatsminister Prof. Dr. Georg Unland, 2013

Unland der Zusammenarbeit mit Gymnasien beimaß, war auch der Abschluss von Patenschaftsverträgen, teilweise sogar unter Einbeziehung von Wirtschaftspartnern. Um Studieninteressenten noch besser über das Angebot der Universität zu informieren, regte er außerdem neben den regelmäßig stattfindenden Tagen der offenen Tür einen „Schnuppertag für Unentschlossene“ an. Dieser findet seit 2001 jährlich Anfang September statt und ist inzwischen zu einer guten Tradition geworden.

Die Kinderuniversität, die erstmals 2003 an der Bergakademie durchgeführt wurde, fand ebenfalls die vollste Unterstützung Prof. Unlands. Heute gibt es u. a. den auf seine Initiative zurückgehenden,

von Frau Kellner eingerichteten Hermann-Spamer-Stiftungsfonds zur Unterstützung von Kinder- und Sommeruniversitäten.

Orientiert an seinem Ziel, die Universität zu stärken und für die Zukunft zu wappnen, war Prof. Georg Unland immer darauf bedacht, neue – teilweise auch unkonventionelle – Möglichkeiten und Chancen für die Universität zu erschließen. So kam er, wiederum geprägt durch seine Kenntnis der amerikanischen Hochschullandschaft, auf den Gedanken, für die Universität eine Stiftung zu gründen. Nach intensiven Vorbereitungen konnte dann im Jahr 2002 – anlässlich des 300. Jubiläums der Stipendienkasse – die Stiftung „Technische Universität Bergakademie Freiberg“ gegründet werden.

Das war nicht nur für die Bergakademie, sondern deutschlandweit ein großer Erfolg. Stiftungen für Universitäten in Deutschland gab es damals noch nicht. Die Stiftung „Technische Universität Bergakademie Freiberg“ war die erste für eine deutsche Universität. Inzwischen zählt die Bergakademie nicht mehr nur zu den ersten, sondern auch zu den erfolgreichsten deutschen Hochschulen, was den Aufbau von Stiftungen und Stiftungsvermögen betrifft. Heute gibt es im Rahmen dieser Stiftung mehrere Stiftungsfonds.

Doch die Gründung der Stiftung „Technische Universität Bergakademie Freiberg“, die deutschlandweit

für Schlagzeilen gesorgt hatte, eröffnete schnell auch weitere Möglichkeiten auf diesem Weg: Schon bald gelang es, zwei weitere große Stiftungen für die Universität einzurichten. Im Jahr 2004 wurde die Pohl-Ströher-Mineralienstiftung ins Leben gerufen. Die Gründung dieser Stiftung war ein Glücksfall – nicht nur für die Universität, sondern auch für die Stadt Freiberg. Nachdem Prof. Unland erfahren hatte, dass die umfangreiche Mineraliensammlung der in der Schweiz lebenden Frau Dr. Pohl-Ströher in die USA gehen sollte, setzte er sich persönlich mit ihr in Verbindung. Einem ersten Telefonat folgten bald zahlreiche Begegnungen und Gespräche mit Frau Dr. Pohl-Ströher, aber auch mit deren

Kindern. So gelang es Prof. Unland, Frau Pohl-Ströher von Freiberg als zukünftigem Ausstellungsort ihrer Sammlung zu überzeugen. Um die Sammlung nach Freiberg zu holen und repräsentativ unterbringen zu können, waren Abstimmungen mit mehreren sächsischen Ministerien erforderlich. Auch mit dem damaligen Finanzminister musste ein machbares Konzept abgestimmt werden. Letztlich führte die im Rahmen der Pohl-Ströher-Mineralienstiftung nach Freiberg übergebene kostbare Mineraliensammlung zur Sanierung des Schlosses Freudenstein. Seit nunmehr fünf Jahren hat dort die Mineralienausstellung „terra mineralia“ ihren Platz gefunden. Prof. Unland persönlich ist es außerdem zu verdanken, dass ausstellungsbegleitend eine hochwertige Publikationsreihe ins Leben gerufen wurde, in deren Rahmen inzwischen mehrere Bücher über Mineralien verschiedener Länder und Regionen erschienen sind.

Neben der Stiftung „Technische Universität Bergakademie Freiberg“ und der Pohl-Ströher-Mineralienstiftung gibt es noch eine weitere große Stiftung für die Universität, die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung. Diese wurde im Jahr 2006 durch Peter Krüger gegründet und nach dessen Vater benannt. Der Gründung dieser Stiftung waren ebenfalls zahlreiche Begegnungen und Gespräche zwischen Prof. Unland sowie dem Stifter und seiner Ehefrau, aber auch mit sächsischen Ministerien, u. a. dem Finanzministerium, vorangegangen. Im Rahmen der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung wurde der TU Bergakademie Freiberg ein viele Millionen Euro umfassendes Immobilienvermögen zum Ausbau der Forschung zur Verfügung gestellt. Die TU Bergakademie Freiberg hatte damit die höchste Zuwendung eines privaten Stifters erhalten, die bis zu diesem Zeitpunkt einer staatlichen Universität in Deutschland zuteil wurde. Die Absicht des Stifters Peter Krüger und seiner Ehefrau Erika

war es, mit den Vermögenserträgen die anwendungsbezogene Forschung an der TU Bergakademie Freiberg zu fördern. Bereits im Jahr 2007 erhielt die TU Bergakademie Freiberg mehr als eine Million Euro als Ausschüttung aus der Stiftung. Ab dem Jahr 2008 erhöhte sich der jährliche Stiftungsertrag kontinuierlich. Die Stiftung fördert beispielsweise die Forschungsinfrastruktur, insbesondere die Anschaffung von Großgeräten.

Eine erste große Maßnahme auf Basis dieser Stiftung war die Ausschreibung für ein sogenanntes Krüger-Forschungskolleg. Ausgewählt wurde das „Freiberger Hochdruckforschungszentrum“ – ein Projekt, an dem ab 2007 acht Professoren von sieben Instituten der Bergakademie gemeinsam an der Entwicklung neuer, extrem harter, unter hohen Drücken erzeugbarer Materialien forschen. So konnte u. a. eine deutliche Verbesserung der Anwendungsperspektiven für Wolframkarbide und Titanitride erreicht werden. Die Stiftung stellte dafür fünf Jahre lang jährlich ca. eine Million Euro zur Verfügung. Inzwischen – zum 1. Mai 2013 – wurde als zweites Krüger-Forschungskolleg das „Biohydrometallurgische Zentrum für strategische Elemente“ eingerichtet, in dem dreizehn Professoren aus vier Fakultäten zusammenarbeiten.

Des Weiteren beteiligt sich die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung seit ihrer Gründung im Jahr 2008 an der Finanzierung der Graduierten- und Forschungsakademie (GraFA). Auch das Krüger-Kolloquium, eine Veranstaltung der GraFA, wird durch die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung finanziert. Im Rahmen dieses regelmäßig stattfindenden Kolloquiums kommen renommierte Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Gesellschaft und Politik zu Wort, die zu aktuellen Themen Stellung beziehen und aus ihrer Arbeit berichten. Die Themenauswahl orientiert sich an den Profillinien der TU Bergakademie Freiberg – Geo, Material, Energie und

Umwelt – und an aktuellen wirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Problemstellungen.

Darüber hinaus hat sich die Stiftung an der Sanierung des ehemaligen Amteshauses, des heutigen Krügerhauses, auf dem Freiberger Schloßplatz beteiligt. Hier ist seit Oktober 2012 die „Mineralogische Sammlung Deutschland“, eine Dauerausstellung von Mineralen ausschließlich aus Deutschland, zu bewundern. Diese beruht auf einer weiteren, durch Rektor Unland im Jahr 2008 gegründeten, Stiftung. In der Ausstellung sind u. a. – wie auch in der „terra mineralia“ – einige Minerale aus der Privatsammlung von Georg Unland ausgestellt. Im Krügerhaus hat heute zudem die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung ihren Sitz.

Neben seinem unermüdlichen Wirken für die Belange der TU Bergakademie Freiberg und der Region brachte sich Unland aktiv in die sächsische Hochschulpolitik ein. So war er von August 2003 bis März 2007 Vorsitzender der sächsischen Landesrektorenkonferenz.

Seit dem 18. Juni 2008 ist Prof. Dr. Georg Unland Sächsischer Staatsminister der Finanzen. Seine Berufung in die sächsische Staatsregierung empfand er zugleich als Ausdruck der Wertschätzung, die der TU Bergakademie Freiberg entgegengebracht wird. „Ich bemühe mich, ein klein wenig von dem zurückzugeben, was mir dieses Land ermöglichte. Es war und ist nicht selbstverständlich, in einem Land zu leben, das uns bis heute ein Leben in Frieden, Freiheit und Sicherheit ermöglicht und persönliche Chancen eröffnet“, sagte er damals.

Wir danken dem Jubilar für sein Engagement, mit dem er sich unserer Universität, der Stadt Freiberg und dem Freistaat Sachsen widmet, und wünschen ihm weiterhin Gesundheit und Wohlergehen sowie Schaffenskraft, Erfolg und Mut für die Meisterung der anstehenden Herausforderungen, Aufgaben und Entscheidungen.

MINERALOGISCHE SAMMLUNG DEUTSCHLAND IM KRÜGERHAUS



Für Wissenschaftler und Studenten, Kenner und Sammler sowie Interessierte und Liebhaber von auserlesenen Mineralen speziell aus deutschen Fundorten findet sich im Krügerhaus in Freiberg eine einzigartige Ausstellung. Den Besuchern präsentieren sich wunderschöne und faszinierende Schätze aus Deutschland: Silberlocken aus Freiberg, Edelsteine aus dem Vogtland, blütenblättrige Barytstufen aus dem Sauerland, grüne Pyromorphite aus Bad Ems, himbeerfarbene Rhodochrosite aus dem Siegerland, wunderschöne Pyrolusite aus dem Schwarzwald, honiggelbe Fluorite aus der Oberpfalz, große Halitwürfel aus Thüringen sowie filigrane Gipskristalle aus Sachsen-Anhalt. Die Präsentation einer vollständigen Sammlung von 743 historischen Holzmodellen von Mineralen, die damals wie heute für die universitäre Ausbildung genutzt wurde und wird, ist ein weiterer Höhepunkt der Ausstellung. Dies sind nur einige der zu bestaunenden Glanzstücke. Entdecken Sie in dieser einmaligen Ausstellung die Vielfalt und Schönheit von Mineralen aus ganz Deutschland!

KRÜGER-STIFTUNG





Schloßplatz 3 · 09599 Freiberg · Tel. 03731 39-4654
 info@kruegerhaus.de · www.kruegerhaus.de

Klaus-Ewald Holst zum 70. Geburtstag

Am 16. Mai 2013 konnte Prof. e. h. Dr.-Ing. Klaus-Ewald Holst seinen 70. Geburtstag begehen (das Geburtsdatum teilt er übrigens mit dem Straßburger Orgelbaumeister Andreas Silbermann, dem Bruder „unseres“ Gottfried Silbermann).

Der Bergakademie Freiberg ist er seit 1962 durch sein Studium der Tiefbohrtechnik und Erdöl-/Erdgasgewinnung bei Prof. Arnold verbunden, 1972 wurde er hier promoviert. Über 40 Jahre gehörte er der Verbundnetz Gas AG an, bis 1989 VEB. In einer der spannendsten Phasen der deutschen Nachkriegsgeschichte ergriff Klaus-Ewald Holst die Initiative zur Rettung der VNG durch Überführung des VEB in eines der bedeutendsten Unternehmen der deutschen Energiewirtschaft: eine Erfolgsgeschichte, sein Lebenswerk. Legendär ist seine Fahrt mit dem Trabant zur Ruhrgaskonzernzentrale in Essen zur erfolgreichen Verhandlung mit dem Ruhrgasvorstand, Klaus Liesen. Als Vorstandsvorsitzender der VNG AG führte er das Unternehmen mit Mut, Entscheidungskraft, Instinkt und Menschlichkeit zum umsatzstärks-

ten Unternehmen im Osten Deutschlands.

Typisch für Klaus-Ewald Holsts Entscheidungswege ist sein Gespür für Kräfte, die dem Menschen innewohnen. Sehr unkonventionell verliehen die Verhandlungen zum Neubau der Konzernzentrale an der Leipziger Braunstraße. Ein junges Architektenteam ohne große Referenzen trat mit geliehenen Anzügen in die Verhandlungen ein und erhielt den Auftrag, der bis zur Fertigstellung 1997 vorbildlich erfüllt wurde. Typisch für ihn ist auch, dass er an seinen persönlichen Erfolgen immer wieder andere teilhaben ließ. Groß war sein Engagement für den Freistaat, für die Region, für Sport und Kultur und besonders für seine alma mater. Ab 1996 war er Vorsitzender des Vereins Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg; bis heute ist er Ehrenvorsitzender des Vereins, Ehrensensator der Hochschule sowie Mitglied ihres Hochschulrats.

Vielfältig sind Klaus-Ewald Holsts internationale Aktivitäten. Im Nachgang zu seinen Verdiensten um wichtige Vertragsabschlüsse mit Norwegen wurde er 1998 Königlich Norwegischer Konsul,



2005 Honorargeneralkonsul für Sachsen, Thüringen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Er ist Träger des Königlich Norwegischen Verdienstordens, des Verdienstordens des Freistaats Sachsens, des Verdienstkreuzes am Bande des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland und des Offizierskreuzes des Verdienstordens der Republik Polen.

2006 ergriff er die Initiative zur Gründung des Deutsch-Russischen Rohstoff-Forums, dessen Präsidium und Lenkungskreis er auch nach seiner Pensionierung angehört.

Zahlreich sind die weiteren Ehrungen, die ihm als einem der profiliertesten deutschen Manager zuteil wurden. All dies charakterisiert aber den Menschen Klaus-Ewald Holst nur unzureichend; dazu muss man ihn persönlich erlebt haben, mit ihm gefeiert und gesungen haben, um sein mitreißendes Temperament einschätzen zu können.

Lieber Klaus-Ewald, Dir und den Deinen ein herzliches Glück auf mit Dank für Dein Lebenswerk, für alle Deine Wohltaten und für Deine Freundschaft.

■ Reinhard Schmidt

Zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Kretzschmar

Der Geschäftsführer unseres Vereins Freunde und Förderer der Technischen Universität Freiberg, Prof. Dr. Hans-Jürgen Kretzschmar, beging am 22. April seinen 70. Geburtstag.

Nach dem Abitur 1961 in seiner Geburtsstadt Döbeln arbeitete er in Erdgasunternehmen als Tiefbohrfacharbeiter im Vorpraktikum zu seinem 1962 an der Bergakademie Freiberg aufgenommenen Studium, das er 1967 als Dipl.-Ing. für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung abschloss. Damit war er einer der ersten Studenten an dem 1962 neu geschaffenen Institut für Tiefbohrtechnik.

Unmittelbar nach dem Studium – neben seiner praktischen Tätigkeit als Angehöriger der Fa. VEB Erdöl-Erdgas Gotha sowie als Assistent am Institut für Tiefbohrtechnik – begann er seine wissenschaftliche Arbeit im

Rahmen seiner Dissertation „Numerische Behandlung der Strömung realer Gase durch poröse Stoffe für die Abbauprojektierung von Erdgaslagerstätten und die Betriebsplanung von Untergrundspeichern“ und wurde 1971 am genannten Institut promoviert (Betreuer Prof. W. Arnold u. Doz. Dr. W. Heeg).

Im Jahr 1978 habilitierte er sich auf dem Gebiet der Modellierung der Untergrundgasspeicherung. In diesen Arbeiten offenbarten sich bereits seine ausgezeichneten Kenntnisse sowie die Fähigkeiten zur Entwicklung von Problemlösungen für die Bewertung und Nutzung unterirdischer Strömungsvorgänge. Hiervon zeugen auch zahlreiche Publikationen zu den Problemkreisen Stofftransport, Solmodellierung, Gebirgsmechanik, Abbauprojektierung, Errichtung und Betrieb von Untergrundspeichern sowie Gasversorgungstechnik. Im Zeitraum 1971–1992 war H.-J. Kretzschmar Leiter der Abteilung Gasspeicher/Geotechnologie am Deutschen Brennstoffinstitut



Freiberg. Er war maßgeblich involviert in die gesamte Entwicklung der Gasspeicherung in der ehemaligen DDR und an nahezu allen Projekten zur Errichtung von Untergrundgasspeichern für Stadtgas und später Erdgas beteiligt. Dies betraf sowohl die Erkundung und Vorbereitung des Untertagebaus (Planung und Begleitung der Bohrungen, Solung von Kavernen) sowie der Obertageanlagen bis hin zur Anbindung an das Gas-Verbundnetz und schließlich den Betrieb von Untergrundgasspeichern (UGS). In seiner Tätigkeit beschäftigte er sich mit allen Speichertypen - angefangen von der Umstellung von erschöpften Gaslagerstätten über Aquifere bis hin zu Kavernen-Systemen für die Hochleistungsspeicherung von Gas. Wesentliche Stationen waren die UGS Bernburg, Bad Lauchstädt sowie Staßfurt und nach der politischen Wende auch UGS in den alten Bundesländern (Ettel, Kalle und Blexen). Darüber hinaus war er auch international ein gern gesehener Planer und Kon-

sultant und wirkte in den Niederlanden, in Russland, Kasachstan, in den USA und in der Türkei.

1993 übernahm Prof. Dr. Kretzschmar die Geschäftsführung der DBI GUT (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig/Freiberg) und führte das Unternehmen durch die nicht immer leichten Zeiten hin zu einem Engineering- und Forschungsunternehmen. In seiner Tätigkeit hat er den Unternehmenscharakter des Hauses den Notwendigkeiten der Marktwirtschaft angepasst und dessen Zukunft gesichert. Das zeigte sich nicht zuletzt auch darin, dass es ihm gelang, die Geschäftsfelder Gasspeicherung, Gasnetze und Gasverwendung des vormaligen Deutschen Brennstoffinstituts aufrechtzuerhalten. Im Jahr 1998 wurde auf sein Betreiben hin das DBI – Gasthechnologische Institut (DBI-GTI) ausgegründet. Dieses vereinigte die einschlägigen grundlagenorientierten Forschungs- und Weiterbildungsaktivitäten sowie eine akkreditierte Prüfstelle zu

einer eigenen Einheit. Zielstellung war die Entwicklung einer gemeinnützigen Forschungseinrichtung am traditionsreichen Standort in Freiberg. Das neu geschaffene Institut erlangte dann auch bald den Status der Gemeinnützigkeit und wurde als Aninstitut der TU Bergakademie Freiberg anerkannt. Mit diesem Schritt wurde die enge Zusammenarbeit zwischen Universität und privater Forschungseinrichtung auch nach außen sichtbar. Seit dieser Zeit hat sich die DBI-Gruppe an den Standorten Freiberg und Leipzig mit ihrem besonderen Profil zu einem international anerkannten Akteur in der Gasthechnik entwickelt.

Ungeachtet seiner intensiven Tätigkeit in der DBI-Gruppe war die Weitergabe seines Wissens an die jüngeren Generationen für Prof. Kretzschmar ein Herzensanliegen. Dies fand Ausdruck in seiner Lehrtätigkeit an der TU Bergakademie Freiberg und der TU Clausthal. Sein Engagement führte dazu, dass ihn das Institut für Erdöl- und Erdgasthechnik

der TU Clausthal im Jahr 2001 zum Honorarprofessor berief. Er betreute auch Diplomarbeiten und Dissertationen am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der TU Bergakademie Freiberg und hielt hier Gastvorlesungen zu Problemen der Gasspeicherung in Aquiferen.

Mit dem Jahr 2007 beendete Prof. Kretzschmar die Geschäftsführung der DBI-Gruppe. In seinem „Ruhestand“ sah er sich nun im Sinne der Pionierarbeit seines Doktorvaters, Prof. Arnold, zur Neugründung des Vereins für Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg in der Verantwortung für die Mitarbeit im Vereinsvorstand als Geschäftsführer. Dieser Aufgabe widmet er sich mit großem Engagement. Er hat durch sein aktives Wirken großen Anteil an der erfolgreichen Entwicklung des Vereins zum Wohle unserer Universität. Wir danken ihm dafür und wünschen ihm beste Gesundheit und viel Erfolg bei allen neuen Vorhaben.

■ Volker Köckritz, Hartmut Krause, Gerhard Roewer

Geburtstage unserer Vereinsmitglieder – Herzliche Glückwünsche und Glückauf!

60. Geburtstag

- Dr.-Ing. Arnold, Claudius, Leipzig
- Herr Wulf, Binde, Berlin
- Dr. phil. Kaden, Herbert, Freiberg
- Dr. Kalmar, Istvan, Budapest
- Dr.-Ing. habil. Kögel, Wieland, Gera
- Dipl.-Ing. Lange, Stefan, Chemnitz
- Dipl.-Ing. Ponert, Günter, Leipzig
- Dipl.-BW. (FH) Ronneburger, Petra, Freiberg
- Dipl.-Ing. Schellig, Jürgen, Segnas
- Prof. Dr. Schmidt, Jürgen, Dresden
- Dr. rer. nat. Schwan, Martin, Dresden
- Dipl.-Ing. Seidel, Matthias, Zwickau
- Siegert, Werner, Ehrenfriedersdorf
- Dipl.-Ing. Sütterlin, Uwe, Gotha
- Prof. Dr. Unland, Georg, Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Volkmann, Norbert, Großschirma

65. Geburtstag

- Dr. Bether, Wolfgang, Hoyerswerda
- Frau Brezinski, Helene, Oberschöna
- Dr. Eckardt, Elke, Freiberg
- Dr.-Ing. Gollnast, Wolfgang, Heckelberg
- Dipl.-Journ. Höppner, Christel-Maria, Striegistal
- Dipl.-Ing. Höppner, Wolfram, Hoyerswerda
- Dipl.-Ing. Horezky, Reinhardt, Dresden
- Dr.-Ing. habil. Keßler, Jürgen, Oberschöna
- Dipl.-Ing. Lesniewski, Bernd, Gera
- Dipl.-Ing. Lewitzki, Wolfgang, Cottbus
- Prof. Dr.-Ing. habil. Meier, Günter, Wegefarth
- Dr. rer. pol. Middendorf, Rolf, Radebeul
- Prof. Dr. Mönch, Wolfgang, Freiberg

- Dipl.-Ing. Raßbach, Kurt, Chemnitz
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Schneider, Jörg W., Freiberg
- Dipl.-Ing. oec. Schramm, Bernd-Erwin, Oberschöna
- Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Sroka, Anton, Dresden
- Dipl.-Ing. Welsch, Wolfgang, Gleichamberg

70. Geburtstag

- Dr. Böttcher, Arnd, Freiberg
- Dipl.-Ing. Brandt, Walter-Wulf, Königs Wusterhausen
- Dipl.-Ing. oec. Dietze, Gerlinde, Großhartmannsdorf
- Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Physiker Fasold, Hans-Georg, Essen
- Prof. Dr. habil. Hebert, Detlef, Freiberg
- Prof. e. h. Dr.-Ing. Holst, Klaus-Ewald, Leipzig
- Dr. oec. Hummitzsch, Rudolf, Leipzig
- Dr. Jesse, Jürgen, Machern
- Dr.-Ing. Kleinitz, Wolfram, Hannover
- Dr.-Ing. e. h. Koch, Peter, Bad Schlema
- Prof. Dr.-Ing. habil. Kretzschmar, Hans-Jürgen, Freiberg
- Dipl.-Ing. Neumann, Klaus, Wendisch Rietz
- Prof. Dr. Niklas, Jürgen, Kleinschirma
- Prof. Dr. Dr. h. c. Reichwald, Ralf, Wolfratshausen
- Dipl.-Ing. Richter, Hans Ulrich, Chemnitz
- Dipl.-Ing. Rückert, Gerhard, Leipzig
- Dr. phil. Runge, Monika, Freiberg
- Dipl.-Ing. Scheibe, Manfred, Großpösna
- Herr Schiemann, Dieter, Berlin
- Dipl.-Ing. Specht, Klaus-Peter, Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Tilch, Werner, Freiberg

75. Geburtstag

- Dr.-Ing. Bayer, Manfred, Oberschöna
- Dipl.-Ing. Berger, Klaus, Motten

- Dr.-Ing. Bittner, Horst, Wilsdruff
- Dipl.-Ing. Bormann, Frank, Großpösna
- Prof. Dr.-Ing. habil. Born, Manfred, Freiberg
- Dipl.-Ing. Breitzkreutz, Egon, Hoyerswerda
- Dipl.-Ing. Egemann, Heinz, Aschersleben
- Dr. Engelhardt, Reiner, Freiberg
- Dr.-Ing. Eulenberger, Karl-Heinz, Freiberg
- Dipl.-Ing. Fischer, Rudolf, Kassel
- Dr.-Ing. Hempel, Dieter, Freiberg
- Dipl.-Ing. Herold, Horst, Taucha
- Dipl.-Ing. (FH) Illing, Dieter, Freiberg
- Dipl.-Ing. Kloppe, Klaus, Berlin
- Dr.-Ing. habil. Kohlstock, Harald, Freiberg
- Dr. sc. oec. Kretzer, Johannes, Freiberg
- Dipl.-Ing. Reg. Dir. a. D. Kutzer, Hans-Joachim W., Windach
- Dipl.-Ing. Link, Joachim, Freiberg
- Dipl.-Ing. Lust, Alfred, Dahlenwarsleben
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Metzging, Peter, Senftenberg
- Dr.-Ing. habil. Michalzik, Günter, Dresden
- Dr.-Ing. Papendick, Gero, Freiberg
- Dr. Dipl.-Geol. Richter, Horst, Freiberg
- Dr.-Ing. Seifert, Harald, Freiberg
- Prof. i. R. Dr. oec. habil. Slaby, Dieter, Freiberg
- Dr.-Ing. Wehrsigg, Hartmut, Freiberg
- Dipl.-Ing. Dr. oec. Zinke, Hans-Georg, Freiberg

80. Geburtstag

- Dipl.-Geophys. Albin, Siegfried, Leipzig
- Dipl.-Ing. Bergemann, Heinz, Berlin
- Prof. Dr.-Ing. habil. Bilkenroth, Klaus-Dieter, Hohenmölsen
- Dr.-Ing. Denecke, Albrecht, Buchholz
- Prof. em. Dr. Dr. h. c. Förster, Wolfgang, Halsbrücke
- Prof. Dr. Guntau, Martin, Rostock
- Dr.-Ing. Hahn, Manfred, Freiberg
- Dr.-Ing. Harzt, Dietmar, Freiberg
- Markscheider i. R. Dipl.-Ing. König, Dietrich, Lübbenau
- Doz. Dr.-Ing. Krüger, Walter, Freiberg
- Frau Michel, Gudrun, Berlin
- Prof. Dr.-Ing. habil. Piatkowiak, Norbert, Großschirma
- Markscheider Dr.-Ing. Schmidt, Tankred, Hoyerswerda
- Dipl.-Ing. Textor, Horst-Ulrich, Mülheim a. d. Ruhr
- Prof. Dr. Toffel, Rolf, Lehre
- Dipl.-Ing. oec. Wegmann, Georg, Erfurt

81. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Diefenbach, Jutta, Dortmund
- Doz. Dr.-Ing. habil. Förster, Siegfried, Freiberg
- Prof. em. Dr. rer. nat. habil. Hofmann, Joachim, Großschirma
- Dipl.-Ing. Hohoff, Wilhelm, Lingen (Ems)
- Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Lehnert, Wolfgang, Freiberg
- Dipl.-Ing. Lenz, Louis, Wittenberg
- Dr. oec. Mitzinger, Wolfgang, Berlin
- Prof. Dr. rer. nat. Raub, Christoph J., Schwäbisch Gmünd
- Dipl.-Ing. Schölzel, Helmut, Muldestausee
- Prof. Dr.-Ing. habil. Straßburger, Christian, Dinslaken
- Dipl.-Ing. Triebel, Karl, Vellmar
- Prof. Dr. rer. nat. Wolf, Monika, Krefeld
- Markscheider Dr.-Ing. Wordelmann, Heinz, Leipzig

82. Geburtstag

- Prof. Dr. rer. nat. habil. Brand, Paul, Freiberg

- Prof. Dr.-Ing. Brandt, Horst, Leipzig
- Dipl.-Ing. Denning, Wilhelm, Buxtehude
- Dr.-Ing. Eidner, Dieter, Freiberg
- Dr.-Ing. Göhler, Peter, Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Hensel, Arno, Chemnitz
- Prof. em. Dr. Klose, Erhard, Freiberg
- Dipl.-Berging. Mertens, Volkmar, Essen-Steele
- Dr.-Ing. Pforr, Herbert, Freiberg
- Dr.-Ing. Träger, Heiner, Büdingen

83. Geburtstag

- Dr.-Ing. Breitbarth, Hans-Jürgen, Dresden
- Prof. Dr.-Ing. Engshuber, Manfred, Ilmenau
- Prof. i. R. Dr. Franeck, Heinzjoachim, Dresden
- Dr.-Ing. Hampel, Manfred, Bochum
- Prof. Dr. Hein, Klaus, Freiberg
- Dipl.-Ing. Knickmeyer, Wilhelm, Essen
- Dr.-Ing. Kraft, Heinz, Bad Reichenhall
- Dipl.-Ing. Meinig, Klaus, Dresden
- Herr Mester, Egon, Buxtehude
- Dr.-Ing. habil. Mohry, Herbert, Leipzig
- Prof. Dr. Dr. Müller, Georg, Clausthal-Zellerfeld
- Dipl.-Ing. Schawohl, Friedrich, Zwickau
- Markscheider Dr.-Ing. Schulze, Günter, Bad Liebenwerda
- Prof. Dr.-Ing. habil. Steinmetz, Richard, Cottbus
- Prof. Dr. sc. techn. Uhlig, Dieter, Altenberg
- Prof. i. R. Dipl.-Geol. Voigt, Günter, Cottbus
- Herr von Oppel, Christian, Saarlouis
- Dipl.-Berging. Weidel, Hans, Aschersleben
- Dr.-Ing. Wilde, Eberhard, Hennigsdorf
- Assessor des Bergfachs Worringer, Dieter, Essen

84. Geburtstag

- Dr. rer. nat. Heeg, Klaus, Ravensburg
- Prof. Dr. Dr. h. c. Kolditz, Lothar, Fürstenberg/Havel
- Dipl.-Geologin Reuter, Renate, Freiberg
- Oberlehrer Richter, Friedrich, Freiberg
- Dipl.-Ing. Schubert, Wolfgang, Bad Elster
- Dipl.-Ing. Schulz, Lothar, Gotha
- Prof. em. Dr. rer. oec. Unger, Lothar, Dresden

85. Geburtstag

- Markscheider Dr.-Ing. Bognitz, Horst, Halle/Saale
- Dipl.-Ing. (FH) Günbler, Peter, Kempen
- Dipl.-Ing. Hirsch, Wolfram, Erkrath
- Dr.-Ing. Klepel, Gottfried, Markkleeberg
- Markscheider Dipl.-Ing. Marx, Hans-Joachim, Freiberg
- Dr.-Ing. Severin, Gerd, Dresden
- Prof. Dr.-Ing. Steinhardt, Rolf, Freiberg
- Dipl.-Geol. Dr. rer. nat. Ullrich, Hellmuth, Sondershausen
- Prof. Dr.-Ing. Wild, Heinz Walter, Dinslaken

86. Geburtstag

- Flach, Siegfried, Damme
- Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Kratzsch, Helmut, Berlin
- Dipl.-Ing. Matthes, Günter, Luxembourg
- Dr. Ing. E. h. Rauhut, Franz Josef, Bottrop
- Prof. Dr.-Ing. habil. Schmidt, Martin, Berlin
- Prof. Dr. sc. techn. Schmidt, Reinhardt, Weimar
- Dipl.-Ing. Stolpe, Egon Emanuel, Nürnberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Wagenbreth, Otfried, Freiberg

87. Geburtstag

- Dr.-Ing. Löhn, Johannes, Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Schneider, Herbert A., Freiberg
- Prof. Dr. sc. techn. Drs. h.c. Schubert, Heinrich, Freiberg
- Prof. em. Dr. Dr. h. c. Weber, Franz, Leoben

88. Geburtstag

- Dr.-Ing. Bartelt, Dietrich, Essen
- Dr.-Ing. Boltz, Gerhard, Lutherstadt Eisleben
- Markscheider Dipl.-Ing. Hartnick, Dieter, Freiberg
- Oberingenieur Unland, Johann, Dresden

89. Geburtstag

- Prof. Dr. Dr. h. c. Heitfeld, Karl-Heinrich, Aachen

90. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Hagelüken, Manfred, Erftstadt-Bliesheim
- Dipl.-Ing. Katzmann, Otto, Nordhausen

92. Geburtstag

- Dr.-Ing. Baunack, Fritz, Bad Hersfeld

93. Geburtstag

- Markscheider Dipl.-Ing. Beyer, Kurt, Dresden

96. Geburtstag

- Prof. em. Dr.-Ing. Neumann, Alfred, Schöneiche b. Berlin

Geburtstagsjubiläen begehen nach dem 29. November 2013:

60. Geburtstag

- Dr.-Ing. Wersch, Matthias, Freiberg

65. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Nagel, Ulrich, Halle/Saale

70. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Eberius, Hans-Joachim, Meerane
- Dipl.-Geophys. Heinze, Konrad, Freiberg
- Dipl.-Betriebswirt Imhof, Dietmar, Freiberg

75. Geburtstag

- Dr. Bernhardt, Claus, Freiberg
- Dr. Pälchen, Werner, Halsbrücke
- Dr. oec. Trillhose, Andreas, Freiberg

81. Geburtstag

- Dr.-Ing. Strasse, Wolfgang, Berlin

82. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Vielmuth, Alfred, Gera
- Dipl.-Geologe Waltemate, Günther, Eichwalde

84. Geburtstag

- Dr. rer. nat. Dipl.-Geophysiker Hiersemann, Lothar, Leipzig
- Dipl.-Ing. Hülsenbeck, Otto, Leipzig

85. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Bannert, Horst, Neuhof

87. Geburtstag

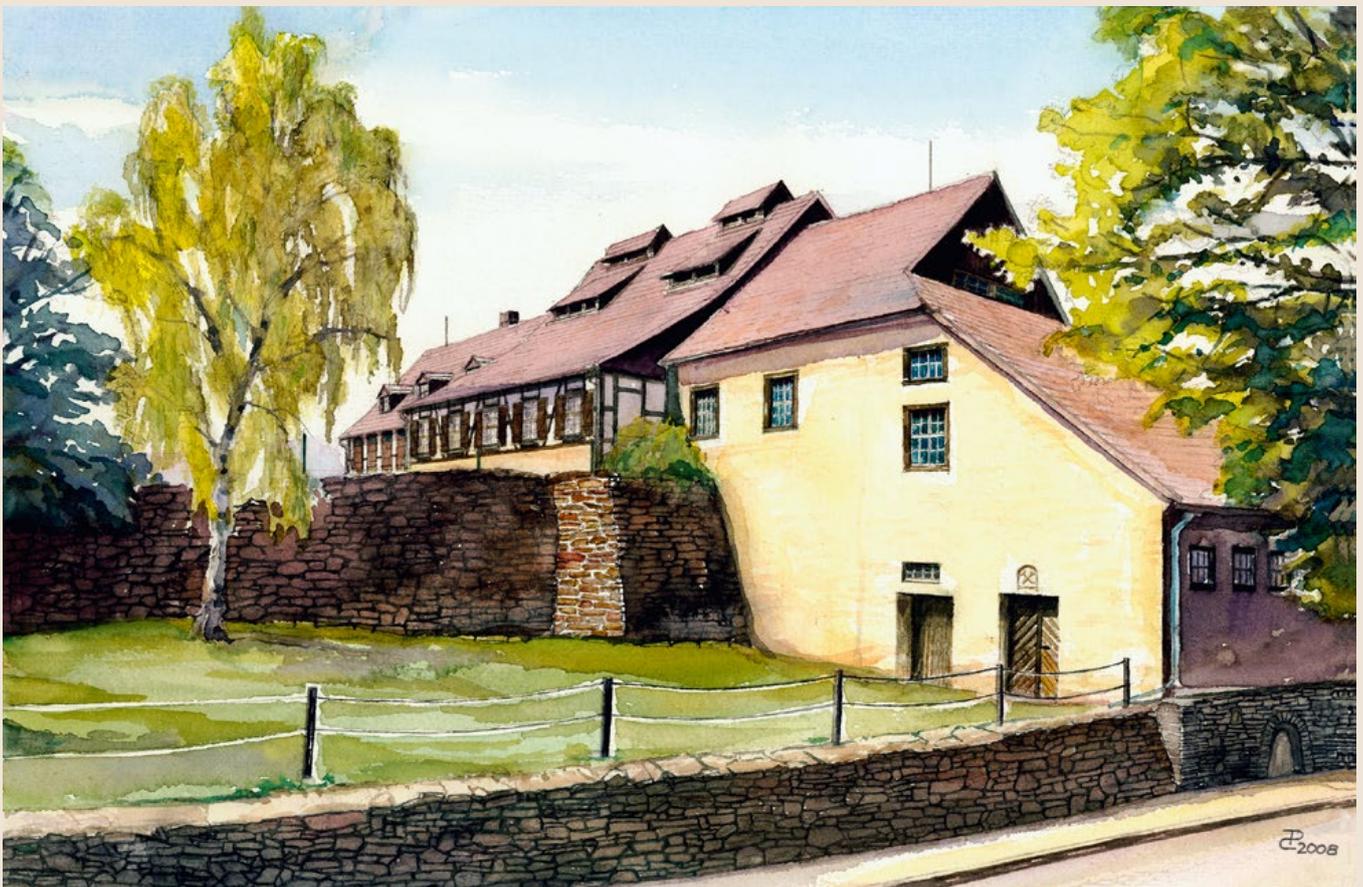
- Dipl.-Ing. Krug, Günther, Lutherstadt Eisleben

88. Geburtstag

- Prof. i. R. Köhler, Johannes, Köln

92. Geburtstag

- Dipl.-Ing. Gärtner, Jürgen, Radebeul



Der Verein wünscht mit dem Aquarell »Grube Alte Elisabeth« (1981) seines Mitglieds Dr. Peter Czolbe allen Lesern der ACAMONTA ein frohes Weihnachtsfest und ein gesundes Neues Jahr 2014!

Freiberg trauert um Wegbereiter des modernen Halbleiterstandorts: Dr. Werner Freiesleben

Der Chemiker und einer der Retter des Freiburger Mikroelektronik-Standorts, Freibergs Ehrenbürger Dr. Werner Freiesleben ist tot. Er starb am 25. Januar im Alter von 83 Jahren in seinem Heimatort Pullach im Isartal.

Der gebürtige Augsburgener war einer der Pioniere bei der gelungenen Privatisierung des ehemaligen VEB Spurenmetalle Freiberg zu drei erfolgreichen, selbstständigen Unternehmen. Dass 2007 „50 Jahre Halbleiterstandort“ in der Universitätsstadt gefeiert werden konnte, ist seinem großen persönlichen Einsatz zu verdanken. Dr. Freiesleben hat Freibergs wirtschaftliche Entwicklung essenziell beflügelt. Seit 1994 wurden durch die drei neu gegründeten Unternehmen insgesamt mehr als 1,5 Milliarden Euro investiert und damit Tausende Arbeitsplätze geschaffen. Oberbürgermeister Bernd-Erwin Schramm würdigte den Verstorbenen: „Er war ein Glücksfall für unsere Stadt, als Visionär der richtige Mann zur richtigen Zeit am richtigen Ort.“ Dr. Freiesleben hat die grundlegende Bedeutung der Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft nicht nur erkannt, sondern stets unterstrichen. In Erinnerung an die Verdienste von Dr.

Werner Freiesleben um die Sicherung und den Ausbau des Halbleiterstandorts Freiberg wird seit 2012 der nach ihm benannte Preis an einen Studierenden der Fakultät für Chemie und Physik oder der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie an der TU Bergakademie für hervorragende fachliche Leistungen und hohes gesellschaftliches Engagement verliehen. Diese Auszeichnung soll die Kooperation zwischen der Bergakademie und der lokalen Halbleiterindustrie weiter stärken. „Dr. Werner Freiesleben war eine Persönlichkeit, die sich in allererster Linie dafür eingesetzt hat, den Menschen in den Bereichen Perspektiven zu geben, in denen ihre Stärken liegen. Durch ihn wurde der Halbleiterstandort Freiberg zu neuer Blüte geführt“, lobte Prof. Bernd Meyer, Rektor der TU Bergakademie Freiberg, die Verdienste des Verstorbenen, dem die Ressourcenuniversität 1996 den Ehrendokortitel verliehen hat.

Nach Abschluss seiner 30-jährigen beruflichen Laufbahn bei der Wacker-Chemie wurde Freiesleben 1988 Direktor des Europäischen Verbandes der Vinyl-Hersteller in Brüssel. 1993 folg-



te er dem Ruf nach Freiberg, wo er bis 1996 Sprecher der Geschäftsleitung der Freiburger Elektronik-Werkstoffe GmbH war. Der Freiburger Compound Materials GmbH (FCM) hielt er bis ins hohe Alter die Treue. Erst im vergangenen Jahr wurde er feierlich aus dem Aufsichtsrat verabschiedet. Dr. Werner Freiesleben wurde mehrfach für sein Wirken ausgezeichnet, u. a. 1984 mit dem Bundesverdienstkreuz. Freiesleben war auch unter dem historischen Aspekt mit Freiberg verbunden. Der Name seiner Familie ist seit dem 17. Jahrhundert eng mit dem hiesigen Montanwesen verknüpft. Sein Vorfahr Johann Carl Freiesleben war von 1838 bis 1842 sächsischer Oberberghauptmann. Dr. Werner Freiesleben hat bis zu seinem Tod die Kontakte zur Stadt gepflegt und gelebt.

Professor Dr.-Ing. habil. Peter Sitz verstorben

Kurz vor der Vollendung seines 75. Lebensjahres verstarb am 21. August 2013 Prof. Peter Sitz in Freiberg. Neun Jahre kämpfte er mit bewundernswerter Energie gegen die Behinderungen im Gefolge eines 2004 erlittenen Schlaganfalls.

Prof. Peter Sitz war von 1993 bis 2003 Direktor des wiedergegründeten Instituts für Bergbau und während des Rektorats von Prof. Dietrich Stoyan von 1993 bis 1996 Prorektor für Forschung.

Peter Sitz wurde am 2. Oktober 1938 in Nordhausen geboren. Nach dem Abitur an der Lessing-Oberschule in Erfurt absolvierte er ein einjähriges Vorpraktikum in verschiedenen Bergbaubetrieben und begann 1957 sein Studium in der Fachrichtung „Bergbau-Tiefbau“ an der Bergakademie Freiberg. Seine berufliche Laufbahn startete er als Assistent am damaligen Institut für Tiefbohrtechnik und Erdölgewinnung bei Prof. Arnold. Seit dieser Zeit forschte, lehrte und betrieb Peter Sitz auf den Gebieten Abteufen

und Ausbauen von Schächten und Bau von untertägigen Verschlussbauwerken in Strecken und Schächten. Sein wissenschaftlicher Werdegang führte ihn 1967 mit der Promotion A zu Untersuchungen über die Haftfestigkeit zwischen Beton und Gebirge und 1980 mit der Promotion B zum Dr. sc. techn. mit einer Arbeit über den Verschluss von untertägigen Grubenbauen mittels Pfropfen und Dammbauwerken bis zur Berufung zum Hochschuldozenten für Spezialverfahren im Bergbau 1986. Besonders wertvoll für seine berufliche Entwicklung waren seine Arbeiten bei der erstmaligen Dimensionierung gasdichter Schachtverschlüsse für den Untergrundgasspeicher Burgraf-Bernsdorf, die Forschungsarbeiten in der Vorwendezeit zu den Schachtverschlüssen im Endlager „Konrad“ und zum Streckenverschlussbauwerk im Forschungsbergwerk „Asse“ in der BRD sowie seine Tätigkeit als Projektleiter bei der Nationalen Genossenschaft zur End-



lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) in der Schweiz. In der Phase der Neuprofilierung der Bergakademie anfangs der neunziger Jahre wurde Peter Sitz 1993 zum Professor für das Fachgebiet „Entsorgungs- und Sanierungsbergbau“ berufen. Als Direktor des Instituts für Bergbau initiierte er auf Grund der Veränderungen – besonders im Bergbau der neuen Bundesländer – die Verlagerung der Schwerpunkte in den Forschungsarbeiten am Institut von den bergbautechnologischen Themen auf das Gebiet des Entsorgungs- und Sanierungsbergbaus.

Mit den Ergebnissen bei der Drittmittelforschung zur Verwahrung von Schächten im Salzbergbau und zu Verschlussbauwerken in Deponien und Endlagern erlangte Prof. Sitz nationale und internationale Anerkennung, die sich mit der Berufung in den Endlagerausschuss der Reaktorsicherheitskommission, in den internationalen Beraterkreis zur Sicherung des Forschungsbergwerks „Asse“ und zum Sachverständigen an verschiedenen Oberbergämtern dokumentiert.

In 110 Beiträgen zur nationalen und internationalen Fachliteratur sowie in Vorträgen auf wissenschaftlichen Tagungen publizierte Prof. Sitz seine Arbeitsergebnisse. Nach seinem Ausscheiden aus dem Hochschuldienst konnte er leider wegen seiner schweren Erkrankung den Fortgang der Forschungsarbeiten nicht – wie beabsichtigt – weiter aktiv unterstützen. Wesentlichen Anteil hatte er auch an der Neuprofilierung der Ausbildung von Studenten auf dem Gebiet Bergbau an der Bergakademie, basierend auf der Zusammenlegung der Fachstudi-

enrichtungen „Bergbau-Tagebau“ und „Bergbau-Tiefbau“ zu einer universellen Bergbauausbildung mit dem Ziel eines vielseitig einsetzbaren, akademisch qualifizierten Bergbauingenieurs. Inspiriert durch seine langjährige Forschung und Zusammenarbeit mit Firmen für spezielle Arbeiten im Bergbau forcierte er die Einrichtung und Ausgestaltung der neuen Studienrichtung „Spezialtiefbau“, die eine sinnvolle Kombination von Elementen der Geotechnik, des Bauwesens und des Bergbaus in der akademischen Ausbildung verkörpert.

Als Hochschullehrer widmete er viel Zeit und Kraft der Betreuung seiner Promovenden, an die er hohe Anforderungen stellte, denen er aber immer helfend zur Seite stand. Er war Gutachter bei zwei Habilitationen und acht Promotionen.

Im Rahmen der akademischen Selbstverwaltung war Prof. Sitz zehn Jahre Direktor des Instituts für Bergbau und Spezialtiefbau, von 1993 bis 1996 Prorektor für Forschung, Mitglied des Konzils und verschiedener Senatskommissionen.

Die vielen Jahre, die Professor Sitz als Student, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professor und noch als Emeritus der Bergakademie verbunden war, haben zu einem großen Freundes- und Bekanntenkreis geführt. Wer zu diesem Kreis gehörte, hat immer seine gewissenhafte Arbeit, Kameradschaft und Geselligkeit geschätzt. Er pflegte darüber hinaus beste Kontakte zu Vertretern in Betrieben, Institutionen und Hochschulen des Bergbaus, was sich mit der 1995 am Institut wieder eingeführten Barbarafeier in der Betstube der „Alten Elisabeth“, der Wiederbelebung des Bergbaukolloquiums und weiterer Veranstaltungen widerspiegelt. Das „Haus Sitz“ war nationalen und internationalen Gästen und den Mitarbeitern für seine Gastfreundschaft bekannt.

Die TU Bergakademie Freiberg hat mit dem Tod von Peter Sitz einen nationalen und international anerkannten Wissenschaftler verloren.

■ Manfred Walde, Friedrich Häfner, Karl-Heinz Eulenberger

Professor Manfred Wünsche verstorben

Am 15. Januar 2013 ist das Mitglied unseres Fördervereins Prof. Dr. rer. silv. habil. Manfred Wünsche im 88. Lebensjahr verstorben. Trotz seiner für einen „Freiberger“ ungewöhnlichen Ausbildung als Forstwissenschaftler hat er an der Bergakademie Freiberg und an anderen mit dem Bergbau befassten Institutionen und Betrieben nachhaltige Spuren hinterlassen. Vielen wird er als ausgezeichnete Fachmann, als untadeliger, charakterfester, urteilssicherer Mensch sowie als zuverlässiger, kameradschaftlicher Kollege und sachlicher Ratgeber oder auch als väterlicher Freund in Erinnerung bleiben.

Manfred Wünsche wurde am 1. Mai 1925 in Thekla bei Leipzig geboren. Wie bei den meisten seiner Altersgenossen wurde sein Lebensweg nach dem am Realgymnasium Leipzig abgelegten Abitur durch einen zweijährigen Fronteinsatz bis zum Kriegsende unterbrochen. Nach dem 1950 abgeschlossenen Forstwirtschaftsstudium an der Forstfakultät der TH Dresden in Tharandt (übrigens wie alle seine beruflichen Prüfungen mit „sehr gut“ bewertet), war er bis 1956 als Standortkartierer im Osterzgebirge und im Elbsandsteingebirge tätig. Diese für einen Forstmann auf übliche Weise begonnene berufliche Laufbahn erfuhr noch im gleichen Jahr eine gravierende

Wendung. Schwelende Halden des Steinkohlenbergbaus im Stadtgebiet von Zwickau waren eines der vom Geologischen Dienst in Freiberg zu bewältigenden Probleme. Für diese seinerzeit neuartige Aufgabe der Wiederurbarmachung von Bergbauhinterlassenschaften holte der damalige Chefgeologe, Prof. Kurt Pietzsch, den Forstwirt und Bodenkundler Manfred Wünsche nach Freiberg, der dieses Problem mit Engagement und unkonventioneller Herangehensweise erfolgreich bearbeitete und 1961 in seiner Dissertation zum Dr. rer. silv. in Tharandt niederlegte. Die Rekultivierung bergbaulich devastierter Flächen sollte von nun an das dominierende Tätigkeitsfeld seines gesamten Berufslebens bleiben. Zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter, später als Fachgebietsleiter und Abteilungsleiter der Abteilung Bodengeologie war er im VEB Geologische Forschung und Erkundung Freiberg mit einschlägigen Aufgaben in den Braunkohlengebieten befasst. Aus dieser Tätigkeitsperiode resultierte auch seine 1976 vorgelegte Dissertation B zum Dr. sc. silv. (1991 umgeschrieben zum Dr. rer. silv. habil.) über „Die bodenphysikalischen, -chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Abraumsstrate und



ihre Eignung für die Wiederurbarmachung im Braunkohlenrevier südlich von Leipzig“. Die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Arbeit und vor allem die systematische, methodische Vorgehensweise fanden hohe Anerkennung im In- und Ausland und hatten wesentlichen Einfluss auf fachliche Richtlinien wie beispielsweise die „Arbeitsrichtlinie Bodengeologie“, die Fachbereichsstandards „Wiederurbarmachung“ und „Rekultivierung“ sowie auf die Kippenrohbodengliederung als Grundlage für die ein-

heitliche Kippenkartierung in der DDR. Manfred Wünsche kooperierte dabei mit Fachleuten aus anderen einschlägig tätigen wissenschaftlichen Institutionen der DDR (Universitäten Dresden, Leipzig, Halle, Berlin, Rostock, Akademie der Wissenschaften Leipzig, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften Eberswalde, Halle, Finsterwalde u. a.) sowie im Rahmen des RGW mit Fachkollegen aus Polen, der ČSSR und Bulgarien. Als Anfang der 1990er-Jahre Kontakte mit Bodenkundlern und Rekultivierungsexperten aus der alten Bundesrepublik möglich waren, wurde offenbar, welche hohe Wertschätzung er durch seine wissenschaftlichen Arbeiten auch dort genoss. Unter den über 110 wissenschaftlichen Publikationen sind auch mehrere Standardwerke, wie durch die Mitarbeit am mehrfach aufgelegten Brockhaus ABC Geologie (Teil Boden) sowie Bodenkarten (Bodenkarte im Atlas der DDR, Bodenkarte Sachsen). Außerdem verzeichnet die Liste seiner fachlichen Aktivitäten eine Vielzahl von Vorträgen auf Fachtagungen der Bodenkundlichen und der Geologischen Gesellschaft der DDR, im Rahmen des Berg- und Hüttenmännischen Tages der Bergakademie sowie an Universitätsinstituten.

Für die Bergakademie Freiberg war Manfred Wünsche seit 1964 als Lehrbeauftragter tätig. Zunächst hielt er auf Anforderung von Prof. H. J. Rösler eine Vorlesung über Bodenkunde für die Fachrichtung Mineralogie-Geochemie. 1970 bis 1992 nahm er auf Initiative von Prof. K. Strzodka einen Lehrauftrag über „Wiederurbarmachung und Rekultivierung im Braunkohlen-, Steinkohlen- und Erzbergbau“ an der Sektion Geotechnik-Bergbau wahr. Immer wurden ihm dabei – neben einem gediegenen wissenschaftlichen Niveau – auch ausgezeichnete didaktische Fähigkeiten bescheinigt.

Das Wendejahr 1990 wäre unter normalen Umständen der Zeitpunkt seines Eintritts in den Ruhestand gewesen. Diese Zeit war jedoch auch eine Situation fachlicher Umbrüche und neuer Weichenstellungen in Wirtschaft, Lehre und Forschung. Die schwerpunktmäßige Orientierung auf Umweltfragen wie Altlastensanierung, Abfallentsorgung und vor allem aber auch die Aufholung des beträchtlichen Rekultivierungsrückstands in den Braunkohlenrevieren hatte auch einen starken Bedarf an bodenkundlicher Kompetenz im weitesten Sinne zur Folge. Sein Rat und seine Unterstützung

waren nun von vielen Seiten gefragt. Die ehemaligen Erkundungsgeologen in den neuen, aus dem VEB Geologische Forschung und Erkundung hervorgegangenen Geo-Unternehmen (Geologische Landesuntersuchung GmbH, G.E.O.S Freiberg) sowie in den Fachbehörden sollten kurzfristig mit bodenkundlichem Fachwissen ausgerüstet werden. Gleichzeitig bestand Ausbildungsbedarf für Direktstudenten der Fachrichtung Bergbau/Tagebau sowie für die postgraduale Weiterbildung im neuen Studiengang Umweltgeotechnik/Entsorgung/Sanierung an der Bergakademie Freiberg. Mithin war der „Ruheständler“ Dr. Wünsche ein willkommenes und gefragtes Experte in dieser Übergangssituation. Er war wesentlich an der Konzipierung und am Auswahlverfahren für die 1995 eingerichtete Professur für Boden- und Gewässerschutz am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau beteiligt. In gleicher Weise hatte er sich Anfang der 1990er-Jahre aktiv agierend und beratend am Aufbau einer bodenkundlichen Struktureinheit im Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie engagiert. Eine Vielzahl von Diplomanden und Doktoranden sowohl an der Bergakademie als auch an anderen Universitäten haben seine fachliche Betreuung und seinen sachlichen Rat gern wahrgenommen.

Es ist den seinerzeit zuständigen Personen in Fakultät und Rektorat der Universität zu danken, dass auf ihren Antrag hin Dr. Wünsche nun auch eine lange vorenthaltene Würdigung seiner Leistungen zuteil werden konnte. Infolge der Verschärfung der fachfremden Sicherheitsbestimmungen in den Betrieben und Instituten des damaligen Ministeriums für Geologie galt er ab 1985 als für Leitungsaufgaben „kaderpolitisch“ nicht mehr geeignet, und ihm war demzufolge „trotz seiner hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen und seiner Lehrbefähigung“ auch eine Hochschullaufbahn versperrt. Die Verleihung des Titels Professor „aufgrund besonderer Verdienste in Lehre und Forschung“ im August 1992 durch den Sächsischen Staatsminister für Wissenschaft und Kunst war daher nicht nur eine späte, sondern in höchstem Maße überfällige und gerechtfertigte Anerkennung seines wissenschaftlichen Lebenswerks und in Anbetracht der oben erwähnten Karrierehemmnisse auch eine persönliche Genugtuung. Seine Kollegen und Schüler werden ihm ein ehrendes Andenken bewahren. ■ **Werner Pälchen**

Wir trauern um unsere Vereinsmitglieder

Verstorbene 2012

Dr.-Ing. **Dieter Dierichs**, Hilbersdorf
* 9. August 1951, † 15. November 2012

Prof. em. Dr. phil. habil.
Harro Uhlmann, Freiberg
* 10. März 1923, † 23. Dezember 2012

Verstorbene 2013

Prof. Dr.-Ing. habil.
Berndt Franke, Freiberg
* 5. Januar 1937, † 15. April 2013

Dr. phil. Dr.-Ing. E. h.
Werner Freiesleben, Pullach
* 14. August 1929, † 25. Januar 2013

Helmut Herrmann, Paunzhausen
* 11. Juni 1931, † 19. März 2013

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c.
Karl Höffl, Freiberg
* 4. März 1932, † 8. April 2013

Dipl.-Ing. **Dieter Reimann**, Kronberg
* 24. Oktober 1925, † 27. April 2013

Regierungsobererrat
Stephan Remy, Freiberg
* 28. Februar 1962, † 4. Juli 2013

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c.
Siegfried Röbert, Weimar
* 21. August 1926, † 26. Mai 2013

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil.
Peter Sitz, Freiberg
* 2. Oktober 1938, † 21. August 2013

Dipl.-Ing. **Bernhard Stoldt**, Schernikau
* 4. Juni 1946, † 2. März 2013

Prof. em. Dr. Dr. h. c.
Franz Weber, Leoben
* 25. August 1926, † 29. Juni 2013

Prof. em. Dr.-Ing., Markscheider
Olaf Wedekind, Dresden
* 14. November 1933, † 30. Juli 2013

Prof. Dr. habil.
Manfred Wünsche, Freiberg
* 1. Mai 1925, † 15. Januar 2013

„Deutschlands verborgene Rohstoffe“ – eine Buchempfehlung

Der Wissenschaftsredakteur Christoph Seidler veröffentlichte 2012 beim Hanser Verlag dieses Buch mit dem Untertitel „Kupfer, Gold und seltene Erden“, das ich Ihnen hiermit wärmstens empfehlen möchte. Das kleine Werk (245 S.) ist äußerst lesenswert und bietet, besonders den Lesern der ACAMONTA, zum Teil eindrucksvolle Begegnungen mit Freiburger und sächsischen Akteuren wie Hannß Carl von Carlowitz, Bernhard Cramer, Jens Gutzmer, Alexander von Humboldt, Uwe Lehmann, Ulrich Loser, Urs Peuker, Matthias Reich, Ferdinand Reich, Horst Richter, Wolfgang Schilka, Reinhard Schmidt, Thomas Seifert, Stanislaw Tillich, Georg Unland, Clemens Winkler und vielen anderen, die in Freiberg wirken oder wirkten.

An anderer Stelle in dieser Ausgabe der ACAMONTA lesen Sie über ein neues Buch zu strategischen Rohstoffen, herausgegeben von den Freiburger Professoren Peter Kausch, Martin Bertau, Jens Gutzmer und dem Verfasser. Mit dem Buch von Seidler liegt Ihnen ein komplementäres Werk vor, das sich hervorragend als Einführung dazu lesen lässt. Seidler schreibt flott und unterhaltsam – und er hat sorgfältig recherchiert. Seine sechs Kapitel folgen einer interessanten Choreographie, die dem Leser die Komplexität der Ressourcenwirtschaft und -industrie sehr anschaulich näherbringt und darüber hinaus realistisch darlegt, wie es denn wirklich um das „rohstoffarme“ (?) Deutschland bestellt ist. Zugleich zeigt er die politischen, gesellschaftlichen und finanziellen Hürden ebenso wie die Herausforderungen zu Umweltfragen auf, die es bei dem Thema mitzudenken gilt.

Seidler beginnt mit dem „Globalen Rohstoffhunger“ und stellt die Frage, was das brandenburgische Spremberg mit der chinesischen Sonderwirtschaftszone Shenzhen verbindet. Die mächtige internationale Rohstoffbörse „London Metal Exchange“ ist das erste Ziel seiner Reise. Dort lernt er die Rohstoffmärkte sowie deren Funktionalität und Einflussgrößen kennen. Das „Auf und Ab“ der Rohstoffmärkte wird ebenso angesprochen wie die durch neue „Spieler“ nunmehr radikal veränderten Randbedingungen auf dieser globalen Spielwiese; nämlich Länder und Händler aus den BRICS-Staaten, vor allem der Volksrepublik China. Denn ob sich zum Beispiel eine Kupferproduktion in Spremberg auszahlen wird, hängt nicht zuletzt vom

Kupferpreis ab, der seinerseits sehr stark durch die Wirtschaftsentwicklung in China getrieben wird. Seidlers Botschaft ist eindeutig: Mit weiterem Bevölkerungswachstum sowie unzureichenden Recyclingraten gibt es keine Alternativen zu neuen und zusätzlichen Bergbauaktivitäten – und da kann es gleich aus mehreren Gründen sinnvoll sein, in Deutschland zu produzieren. Hier gibt es sehr gute Umweltstandards und -gesetze, eine angemessene Kontrolle dieser Regelwerke und, wenn die Weltmarktpreise hoch genug sind, lohnt sich der hiesige Abbau und kann die Ressourcenabhängigkeit spürbar mildern. Die Rolle der deutschen Rohstoffagentur (DERA) in Hannover mit ihrem (Freiberger) Chef Dr. Volker Steinbach spielt hier ebenso eine Rolle wie der VDI und das Berliner Museum für Naturkunde. Illustriert werden die Lokalitäten stets durch kleine Karten, die dem Leser die Reise noch schmackhafter machen – und zugleich verdeutlichen, dass in einer vernetzten Welt gerade auch Ressourcenfragen nicht mehr auf nationaler Ebene beantwortet werden können. Das Festmachen der Fakten an Personen, Akteuren im Bild, ist hierbei von besonderem Reiz und macht das Lesen zu einem kurzweiligen Vergnügen.

Im zweiten Kapitel, „Kupfer aus der Lausitz“, beschreibt der Autor die Aktivitäten der polnischen KGHM Kupfer AG und der in Panama ansässigen Firma Kupferschiefer Lausitz. Was bedeutet ein durchaus substantieller Kupferabbau über vier bis fünf Jahrzehnte in dieser strukturschwachen Region? Und welchen Anteil hat die überaus intensive Vorarbeit der geologischen Forschung und Erkundung zu DDR-Zeiten für dieses neue, sächsisch-brandenburgische Bergeschrey? Seidler stellt diese Fragen mit Bedacht und Umsicht und antwortet erfreulich differenziert, ohne sich in Details zu verirren, die einer technischeren Beschreibung vorbehalten wären.

„Erze und Spate aus dem Erzgebirge“ lautet der Titel des dritten Kapitels, in dem vor allem Freiberg, Dippoldiswalde, Annaberg-Buchholz, Niederschlag, Altenberg und Zinnwald sowie Geyer, Zschorlau und Dresden eine wesentliche Rolle spielen. Die Vielstimmigkeit des neuen erzgebirgischen Bergeschreys wird umfassend und realistisch kolportiert. In allen Kapiteln, so auch in diesem

werden neben den Karten auch kurze didaktische Boxen angeboten, in denen Wissenswertes zu den einzelnen Wertstoffen zusammengetragen ist; hier zum Beispiel zu Indium, Gallium, Germanium und Tantal.

Das vierte Kapitel widmet sich „Einheimischem Öl und Gas“ – und dies wiederum nicht allein historisch, sondern auch im Hinblick auf die noch immer hoffigen Regionen im norddeutschen Becken, in der bayerischen Molasse im Voralpenraum sowie im Rheingraben, wo die Chancen noch längerer Ausbeute durch Methoden wie das Fracking bestehen und genau diese Techniken vom Verfasser kritisch und vorurteilsfrei vorgestellt werden. Im Fazit deutet sich an, was inzwischen wohl fast als Faktum gesehen werden kann, dass es sich in Deutschland kaum lohnt, auf eine Zukunft der Kohlenwasserstoff-Lagerstätten zu hoffen.

Ganz anders sieht es mit dem auch volkswirtschaftlich wesentlichen Komplex der Steine und Erden-Industrie aus. „Vom Rheingold und von Tiefseeknollen“ ist der Titel des fünften Kapitels. Es zeigt zwei sehr heterogene Aspekte der Rohstoffsuche und -gewinnung. Auf der einen Seite steht der Gewinn von Gold und anderen typischen Seifenlagerstättenkomponenten (Minerale mit hoher Dichte) als Beiprodukt der Gewinnung von Sand und Kies, zum Beispiel aus Rhein- und Elbauen. Das ist verfügbare Technologie, umweltfreundlich und kann ein intelligentes Zusatzgeschäft neben „Brot und Butter“ durch die Massenrohstoffe für die Bauindustrie sein. Ganz im Gegensatz dazu beschreibt Seidler die Bemühungen um submarine Lagerstätten im Bereich tiefmariner Becken (Mangan- bzw. polymetallische Erzknollen) und an mittelozeanischen Rücken (polymetallische Sulfidvererzungen). Deutschland hat in beiden Bereichen „Claims abgesteckt“, doch wie fruchtbar diese sein können, ist bis heute eine ebenso offene Frage, wie die Konsequenzen eines Abbaus auf die äußerst verletzte Umwelt der tiefmarinen Ökosysteme.

Das sechste und letzte Kapitel widmet sich der „Zukunft der Rohstoffe“. Dass dabei wiederum aktuell aktive Freiburger Forschungsbereiche angesprochen werden (BHMZ, HIF, etc.) mag nicht verwundern; der Autor hat seine Hausaufgaben gemacht. Mit dem Untertitel „Ressourcen und Recycling“ beleuchtet der Verfasser die Potenziale sekundärer

Ressourcen und der Recyclingtechnologien. Er kommt zu dem Schluss, dass es hier noch sehr große Potenziale gibt. An Beispielen aus Freiberg, Bad Schlema und Aue (letztere im Hinblick auf die Wismut AG) beschreibt der Autor die laufenden Aktivitäten zum Aufwältigen von Abfallmaterial sowohl aus Haushaltungen und Industrie (Deponien) sowie von industriellen Absetzteichen (Tailings) und Bergehalde und die Potenziale des *Urban Mining*. Zugleich weist er auf die Chancen (und Risiken) hin, die ein ultratiefer Bergbau birgt und zeigt, dass dies nicht notwendig mit dem Bau von Schachtanlagen und Tunneln verbunden sein muss, sondern mit Robotik und bakterieller (biochemischer) Lösung von Wertstoffen vor Ort, die anschließend an die Tagesoberfläche zu pumpen und aufzubereiten sind.

Im abschließenden Fazit unterstreicht Seidler, dass Deutschland mitnichten ein rohstoffarmes Land ist. Im Gegenteil werden gerade durch derzeit auch stark in Freiberg betriebene Forschung (Krüger-Kolleg Biohydrometallurgisches Zentrum, BHMZ; Helmholtz Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, etc.) neue Horizonte erkennbar, die unserer Region noch lange eine bedeutende Rolle bei der Ressourcenversorgung einräumen – und dies ohne die sattsam bekannten und in Zukunft schlicht nicht mehr akzeptablen Umweltschäden.

Dieses Buch bietet einen sehr gut recherchierten (und zu Recht nicht auf Freiberg und Umgebung begrenzten) Blick auf den aktuellen Stand der Rohstoffsituation unseres Landes sowie der absehbaren Zukunft dieser Situation. Ja, dem Autor unterliefen auch kleine

Fehler, vor allem technischer Natur; er nutzt ein paar Begriffe nicht korrekt und hat an einigen Stellen ein paar kleine Missverständnisse erfahren. Und einige Formulierungen sind vielleicht mehr der schönen Sprache wegen („das bittere Ende der DDR“) durch das Lektorat gerutscht, als dass eine Geisteshaltung zu unterstellen wäre.

Ich möchte das Buch allen ans Herz legen, die sich einen sehr gut verständlichen und sehr angenehm zu lesenden Grundstock für das Verständnis der aktuellen (und absehbar zukünftigen) Rohstoffversorgungssituation Deutschlands legen möchten und „nebenbei“ einen wirklich gut recherchierten und breiten Einblick in die Themen der Ressourcenwirtschaft – von der frühesten Phase der Exploration bis zu Verwertung und Handel – erhalten wollen. ■ Jörg Matschullat

Geschichten zur Geschichte Altrector Dietrich Stoyan reflektiert sein Leben

Zum Jahreswechsel 2001/2002 gehörte der Freiburger Mathematiker Prof. Dietrich Stoyan zu den begehrtesten Interviewpartnern. In zahlreichen Ländern Europas wurde der Euro als Zahlungsmittel eingeführt, und Journalisten gaben sich die Klinke in die Hand, um über seine Idee der Euromobil-Aktion zu berichten. Von Beginn der Umstellung an untersuchte der Stochastiker, wann, wo und welche ausländischen Euro-Münzen zuerst in Deutschland auftauchen und wie sich im Laufe der Zeit die verschiedenen Ländermünzen in den Geldbörsen der Menschen durchmischten. Dazu bat er die Öffentlichkeit, ihm ihre Zählergebnisse mitzuteilen. Wie er zu dieser Idee kam und welche Ergebnisse die Auswertung der Daten brachte, beschreibt Stoyan in der vorletzten Episode seines autobiografischen Buches „In zwei Zeiten: Ein Altrector der TU Bergakademie erzählt“. Der Band erschien Ende 2012 im Jacobs Verlag.

Es ist nicht das erste Buch des Wissenschaftlers, der von 1991 bis 1997 Rektor der TU Bergakademie Freiberg war. Neben zwölf Fachbüchern hat er in jüngster Zeit großen Anteil an der Herausgabe eines Bandes zur Geschichte der TU Bergakademie Freiberg und des attraktiven Bildbands „Wissenschaft vor Ort“. Das vorliegende Buch aber ist das persönlichste, denn darin reflektiert er sein Leben ungeschminkt und selbstkritisch, teils mit ironischem Unterton. Die erste Episode beginnt nicht in der

Kindheit, sondern mit einem Auszug aus seiner Stasi-Akte und Erinnerungen an den 1. Weltkongress der Statistiker in Taschkent und einem Nachruf. Stoyan, 1940 in Berlin geboren, musste in den letzten Kriegsjahren mit der Mutter und den drei jüngeren Geschwistern mehrmals umziehen. Einige Jahre lebten er und seine beiden Brüder im Kinderheim in Halberstadt. Der Vater galt 1945 als verschollen, und es gelang den Söhnen erst viel später, nach vielen Recherchen, die Umstände seines Todes aufzuklären. Nach dem Abitur kam Dietrich Stoyan ausgerechnet durch eine Anzeige im „Neuen Deutschland“ zu seinem Mathematik-Studium an die TH Dresden. Dort lernte er auch seine Frau Helga kennen. Nach erfolgreichem Diplomabschluss begann für beide 1964 im Deutschen Brennstoff-Institut (DBI) in Freiberg die berufliche Karriere.

Für sein Buch hat er Erlebnisse und Ereignisse aufgeschrieben, die ihm wichtig sind. Ob Kindheitserinnerungen, das Studentenleben oder Episoden aus dem Wissenschaftsalltag, auffallend sind sein Bemühen um realistische Darstellung und die Detailfülle. Stoyan führt seit früher Jugend Tagebuch und konnte so bei den Recherchen auf die Aufzeichnungen zurückgreifen. Das macht die Texte authentisch und unterhaltsam, manchmal aber auch beklemmend. Sehr sympathisch sind die Passagen, in denen er über seine Frau Helga erzählt. Man spürt darin die tiefe Zuneigung und Achtung, die er für sie empfindet.

Zwei Drittel des Buches befassen sich mit seiner Wirkungszeit an der TU Bergakademie. Zwar meint der Autor in einem Interview, dass sein Leben typisch sei für Wissenschaftler seiner Generation, doch gerade die Besonderheiten, die er als parteiloser Wissenschaftler erlebt hat und die ihn auch prägten, machen den Unterschied aus. Den Buchtitel „In zwei Zeiten“ hat er bewusst gewählt. Damit charakterisiert er nicht nur sein Leben in den beiden Gesellschaftssystemen DDR und BRD, sondern auch seine Wandlung vom beobachtenden Abseitsstehenden zum aktiven Mitgestalter.

Angehörige der Universität, die die Wendezeit und die Jahre danach nicht miterlebt haben, aber daran interessiert sind, bekommen Einblicke in den damaligen Wissenschaftsbetrieb. Manches stellt sich im Nachhinein auch ernüchternd dar. Auf alle Fälle sind die persönlichen Erinnerungen eine willkommene Ergänzung zu offiziellen Texten und Überlieferungen aus dieser Zeit. Es sind auch hier viele Details, sind einzigartige Momentaufnahmen. Ob nun Hintergründe zur Wahl als Prorektor oder die Arbeit der Strukturgruppe zur Universitätserneuerung beleuchtet werden oder Entscheidungen und Zwänge des Rektors kommentiert beziehungsweise Begegnungen mit Politikern wie Rita Süßmuth und Gerhard Schröder beschrieben werden – spannend und unterhaltsam sind die Texte allemal. Denn sie spiegeln Zeitgeschichte aus ganz persönlicher Sicht. ■ Christel-Maria Höppner

- Prof. Dr. Mohammed Amro, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Christos G. Aneziris, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Nat. Daniela Bauer, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Hartmut Baum, Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Martin Bertau, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. habil. Uwe Böhme, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Kfm. Klaus Borrmann, Freiberg
- Dipl.-Ing. Nora Brachhold, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. Christoph Breitzkreuz, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Erica Brendler, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. Stefan Busch, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Gök. Philipp Büttner, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
- Dr. rer. nat. habil. Peter Deus, Freiberg
- Prof. Dr. Carsten Drebenstedt, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Steffen Dudczig, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Eiermann, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Marcus Emmel, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Joachim Engelmann, Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH
- Dr.-Ing. Karl-Heinz Eulenberger, Freiberg
- Daniel Falk, Freiberg
- Dipl.-Ing. Franz Fehse, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Undine Fischer, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. pol. Indra Frey, Freiberg
- Dr. rer. nat. Daniela Freyer, TU Bergakademie Freiberg
- M.Sc. Jan Friedemann, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Christin Fritze, SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH
- Dr.-Ing. Matthias Fuhrland, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. Richard Gloaguen, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Grabow, Freiberg
- Dr.-Ing. Stefan Guhl, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. habil. Heiner Gutte, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Jens Gutzmer, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Friedrich Häfner, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. habil. Mike Hausteil, Nickelhütte Aue GmbH
- Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Heide, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Jan Henker, SolarWorld Solicium GmbH Freiberg
- Dipl.-Ing. Volker Herdegen, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Journ. Christel-Maria Höppner, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. pol. Andreas Horsch, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Gottfried Jäckel, Freiberg
- Dr. rer. nat. Eberhard Janneck, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Halsbrücke
- Dr. rer. nat. habil. Frieder Jentsch, Chemnitz
- Dr. rer. nat. Ulf Kempe, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Reinhard Kleeberg, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Kfm. Jacob Kleinow, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Volker Köckritz, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Kurt Köhnke Plauen
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Jens Kortus, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Hartmut Krause, DBI Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Kretzschmar, VFF
- Dr.-Ing. Marius Kroll, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Steffen Krzack, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Thomas Kuchling, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Geol. Kersten Kühn, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Halsbrücke
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Sven Kureti, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Monika Kurková
- Dr.-Ing. Mario Kuschel, Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH
- Dr. rer. nat. Uwe Lehmann, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- Dipl.-Ing. Thomas Leißner, TU Bergakademie Freiberg
- M. Sc. René Luhmer, TU Bergakademie Freiberg
- Ludwig Luthardt, Freiberg
- Dipl.-Chem. Gunther Martin, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Stefan Martin, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Chem. Mirko Martin, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Halsbrücke
- Dipl.-Min. Andreas Massanek, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Jörg Matschullat, TU Bergakademie Freiberg
- Oberlehrer i. R. Ernst Menzel, Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Bernd Meyer, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Uwe Meyer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- Prof. Dr. rer. nat. Armin Müller, SolarWorld Solicium GmbH Freiberg
- Dipl.-Wi.-Ing. Tobias Nell, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Math. Melanie Nentwich, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Geol. Jörg Neßler, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. pol. Michael Nippa TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing.habil. Heinrich Oettel, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. Inga Osbahr, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias Otto, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Werner Pälchen, Halsbrücke
- Dr. rer. nat. Carsten Pätzold, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Urs A. Peuker, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Ulrich Peuser, AKW Apparate+Verfahren GmbH Hirschau
- Dipl.-Ing. Martin Pfütze, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Norman Pohl TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Kffr. Sylvie Preiss, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Chem. Philipp Rathsack, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Denise Reichel, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Jens-Uwe Repke, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Andreas Richter, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerhard Roewer, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. pol. habil. Silvia Rogler, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Wi.-Ing. Stephan Rohleder, TU Bergakademie Freiberg
- M.Sc. Vasileios Rongos, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Helmut Schaeben, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. Wolfgang Schilka, EFS Geos Oberwiesenthal
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Schlämann, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Chem. Mirjam Schmidt, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Horst Schmidt, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Reinhard Schmidt, Freiberg
- M.Sc. Katja Schneider, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Hans-Werner Schröder, TU Bergakademie Freiberg
- Nico Schultze, Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernhard Schulz, TU Bergakademie Freiberg
- Stephanie Schüttauf, Freiberg
- Dipl.-Slaw. Birgit Seidel, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Peter Seifert, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Seifert, TU Bergakademie Freiberg
- Susanne Siegel, Freiberg
- Dr. rer. nat. Bernhard Siemon, Bundesanstalt für Geowiss. und Rohstoffe
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Klaus Spitzer, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Mus.-Päd. Eberhard Spree, Leipzig
- Dipl.-Ing. (FH) Sabine Starke, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Geol. Saskia Stein, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
- Carolin Steinborn, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. Michael Stelter, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Hartmut Stöcker, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Dietrich Stoyan, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Kfm. Sandro Veit Straub, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Silvio Stute, SolarWorld Solicium GmbH Freiberg
- M. A. Martin Tettenborn, TU Bergakademie Freiberg
- Dr. rer. nat. Dirk Tischler, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Georg Unland, Sächs. Ministerium der Finanzen
- Prof. Dr. rer. nat. Norbert Volkmann, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Archiv. Roland Volkmer, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Markus Wagner, Dresden
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Steffen Wagner, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Manfred Walde, Freiberg
- Dipl.-Kffr. Daniela Walther, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Christian Wegerdt, Freiberg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Elias Wegert, TU Bergakademie Freiberg
- Dr.-Ing. Torsten Westphal, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Geoökol. Bianca Wolf, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Maria Wollmerstädt, TU Bergakademie Freiberg
- Dipl.-Ing. Hendrik Wollmerstädt, TU Bergakademie Freiberg

Herausgeber: Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V. und der Rektor der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
 Vorsitzender: Prof. Dr. Klaus-Dieter Barbknecht
 Geschäftsführer und Stellvertretender Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Kretzschmar
 Redaktionsleitung: Prof. Dr. Gerhard Roewer
 Redaktionskollegium: Prof. Dr. Helmuth Albrecht, Dipl.-Journ. Christel-Maria Höppner, Dr.-Ing. Klaus Irmr, Dr. Herbert Kaden, Dipl.-Slaw. Birgit Seidel, Prof. Dr. Peter Seidelmann
 Gestaltung/Satz: Brita Gelius
 Druck: Druckerei Wagner, Siebenlehn
 Auflage: 1.800
 Postanschrift Verein: Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V., 09596 Freiberg
 Geschäftsstelle: Nonnengasse 22, 09599 Freiberg
 Telefon: +49 (0)3731 39-2559, 39-2661 · Fax: +49 (0)3731 39-2554

E-Mail: freunde@zuv.tu-freiberg.de
 Internet: <http://tu-freiberg.de/vereine/vff/index.html>
 Jahresbeitrag: 30 EUR Einzelmitglieder; 250 EUR juristische Mitglieder
 Für Nichtmitglieder: 10,00 EUR pro Heft (kostenlos für Vereinsmitglieder)
 Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht unbedingt die Meinung der Herausgeber und der Redaktion wieder. Keine Haftung für unverlangt eingesandte Manuskripte. Die Autoren stellen die Beiträge honorarfrei zur Verfügung. Auszugsweiser Nachdruck von Beiträgen bei Angabe von Verfasser und Quelle gestattet. Im Sinne der Wünsche von Autoren und Lesern nach detaillierterer Information hat das Redaktionskollegium eine relativ hohe Anzahl von Quellenangaben für einzelne Beiträge akzeptiert. Die Art der Literaturzitation wurde aufgrund der unterschiedlichen Fachgebiete dabei jeweils den Autoren überlassen. Männliche/weibliche Form: Aus Gründen der Vereinfachung und besseren Lesbarkeit ist in den Beiträgen gelegentlich nur die männliche oder die weibliche Form verwendet worden. Wir bitten, fehlende Doppelnennungen zu entschuldigen.
ISSN 2193-309X