

# RWTH THEMEN

**Forschungsmagazin**

**Ausgabe 2/2016**

Kompetenzbereich  
Rohstoffe und Recycling



DER NEUE FORD **EDGE**  
Jetzt bei Ihrem Ford Partner!

Auffallend anders: Der neue Ford Edge hebt sich eindrucksvoll von der Masse der SUVs ab. Mit seinem markanten Design, exklusiver Ausstattung und hervorragendem Fahrverhalten setzt er wahre Highlights. Interessiert an unserem Größten? Erleben Sie den neuen Ford Edge jetzt live bei Ihrem Ford Partner!



Eine Idee weiter

# Inhalt

- 6 **Rohstoffe und Recycling sichern Produktion**  
Interdisziplinäre Forschung rund um Lagerstätten, Aufbereitung, Produktion und Abfallbehandlung
- 10 **Lassen sich Manganknollen im Pazifik wie Kartoffeln ernten?**  
Tiefseebergbau gewinnt Hochtechnologierohstoffe
- 16 **Rehabilitation und Nachsorge von Bergbaulandschaften**  
Entwicklung von ökologisch und sozial verträglichen Alternativen
- 22 **Sicher gewinnen**  
Wie sich Rohstoffe gefahrloser abbauen lassen
- 24 **Geometallurgie bewertet Rohstoffe**  
Prozessoptimierung entlang der Wertschöpfungskette kritischer Metalle
- 30 **Wir gewinnen Kohle – hören Sie es?**  
Wie Sensorik den Bergbau revolutioniert
- 36 **Aufbereitung seltenerdhaltiger Erze**  
Anwendbarkeit der sensorgestützten Sortierung
- 38 **Welchen Wert hat Restabfall?**  
MARSS-Modul unterstützt Verwertung der biogenen Fraktion im Restabfall
- 46 **Thermisch-pyrolytische Aufbereitung von Metallkonzentraten**  
Aufschluss von Verbundstoffen zur Wiedergewinnung von Metallen
- 50 **Effizientes Recycling von Elektronikschrott**  
Die Herausforderung, 20 Metalle zurückzugewinnen
- 54 **Ressourcenkritische Legierungselemente einsparen**  
Neue Konzepte für Werkzeugstähle
- 60 **Stahlkochen mit Kirschkernen**  
Unkonventionelle Einsatzstoffe für die Eisen- und Stahlmetallurgie
- 64 **Wie aus Glaswannensteinen ein gleichwertiger feuerfester Werkstoff wird**  
Recyclingidee auf gleicher Wertschöpfungsebene
- 68 **Kostenwirkungsgradrechnung: gut für Wirtschaftlichkeit und Umwelt**  
Zyklische Kostenbeziehungen und Wertschöpfungsverluste
- 72 **Wie Grün sind unsere Metalle?**  
Analyse der Umweltwirkungen entlang von Wertschöpfungsketten
- 76 **Ewige Verantwortung für Abfälle?**  
Wann endet die abfallrechtliche Entsorgungspflicht?
- 78 **Education 4.0 in den Ingenieurwissenschaften**  
Herausforderungen und Potenziale
- 80 **Den Rohstoff- und Recyclingsektor in Bewegung bringen**  
Start-up-Förderung der RWTH Aachen
- 84 **Gemeinsam agieren**  
Aufbau transdisziplinärer Rohstoffnetzwerke
- 90 **Namen & Nachrichten**
- 94 **Impressum**



## Recycling contra Klimakiller

Deutschland konnte das erste Teilziel des Kyoto-Protokolls bereits erreichen: die Reduzierung des Ausstoßes von Methan um Faktor 20. Dieses Gas, das bei Verrottung von organischen Materialien auf Mülldeponien entstand, ist 26-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid. Die Schließung dieser Deponien und stattdessen lückenloses Recycling und die verringerte Freisetzung von CO<sub>2</sub> bei der Abfallverbrennung haben uns den Kyoto-Zielen näher gebracht.

Sehen Sie Ihre berufliche Zukunft im Recycling? Dann bewerben Sie sich auf [remondis-karriere.de](http://remondis-karriere.de)

REMONDIS SE & Co. KG // Brunnenstr. 138 // 44536 Lünen // Deutschland  
T +49 2306 106-0 // F +49 2306 106-100 // [info@remondis.de](mailto:info@remondis.de) // [remondis.de](http://remondis.de)

# Vorwort



Foto: Peter Winandy

44.517 Studierende sind in diesem Wintersemester für einen Studiengang der neun RWTH-Fakultäten eingeschrieben. 6.582 junge Menschen starteten in ihr erstes Fachsemester, 3.261 Studierende nahmen ein Masterstudium auf. Die Aachener Hochschule liegt mit diesen Zahlen wieder auf Höchstniveau. Rankings und Personalverantwortliche bescheinigen unseren Absolventinnen und Absolventen eine sehr gute Ausbildung. Dies erfordert allerdings auch eine angemessene Infrastruktur. Daher freuen wir uns, dass in diesem Semester der Probetrieb im neuen Hörsaalzentrum C.A.R.L. aufgenommen wurde. Es bietet künftig in elf Hörsälen und 16 Seminarräumen Platz für 4.000 Studierende. Rund 45 Millionen Euro aus dem Hochschulmodernisierungsprogramm des Landes Nordrhein-Westfalen wurden hier investiert.

Mit zahlreichen Maßnahmen unterstützen wir Schülerinnen und Schüler bereits in der Orientierungsphase vor einer Studienentscheidung. Erfolgreich haben wir gemeinsam mit der FH Aachen das Projekt „Guter Studienstart im Ingenieurbereich“ realisiert. Die jungen Menschen können ein Semester lang an beiden Hochschulen reguläre Veranstaltungen besuchen und herauszufinden, welche Hochschule und welches Fach zu ihnen passt. Die beiden Aachener Hochschulen konnten kooperativ für ein weiteres Projekt Fördergelder des Landes einwerben: Ab Januar 2017 werden Talentscouts weiterführende Schulen besuchen und dort begabte Jugendliche informieren und beraten. Im Fokus stehen dabei Kinder aus Familien ohne akademischen Bildungshintergrund. Ziel ist es, Talente zu finden und allgemein Wege in ein Studium aufzuzeigen.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre!

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Ernst Schmachtenberg  
Rektor der RWTH Aachen

This winter semester, 44,517 students are enrolled in courses of study offered by RWTH's nine faculties. 6,582 new students embarked upon their studies, and 3,261 graduate students enrolled in a Master's program. These student numbers set yet another record high for our University. Rankings and surveys among human resources managers testify to the high quality of our programs and of our graduates. This, however, requires an appropriate infrastructure, and so we are glad that the new C.A.R.L. lecture hall center is now in pilot operation. The new center will host eleven lecture halls and 16 seminar rooms. The University Modernization Program by the Federal State of North-Rhine Westphalia contributed about 45 million Euros for the construction of the new building.

Furthermore, RWTH Aachen has many measures in place to support school students in their decision whether or not to attend university and what course of study to choose. One successful example is the "A Good Academic Start in Engineering" project, a collaboration between RWTH and the FH Aachen University of Applied Sciences. The initiative makes it possible for prospective students to participate in classes of both universities in a one-term orientation phase. In this way, the students have the opportunity to find out for themselves which university and which subject best suits them. Moreover, FH and RWTH were able to acquire state funding for another project: Starting in January 2017, talent scouts will visit secondary schools in order to provide talented pupils with information and advice. In particular, they will pay attention to children from families who do not have an academic background. The aim is to identify talents and show them possible paths to university.

I wish you an interesting read!

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Ernst Schmachtenberg  
Rector of RWTH Aachen University

# Raw Materials and Recycling are Essential for Germany's Production

Interdisciplinary Research focusing on Mineral Deposits, Processing, Production, and Waste Management

The economic success of Germany and other European nations is based on their capability to create top quality products within short periods and to develop long-term economic relationships. Innovative and environmentally friendly technologies only can be realized, however, as long as the required materials and energy carriers are available in sufficient amounts and at acceptable costs.

Nowadays, metals that are of strategic economic importance have a strong leverage effect. In economies such as Germany, which are dependent on the import of raw materials, a supply shortage may result in the halting of activity along entire value chains. This applies to rare earth oxides, for example, which are essential for green technologies such as wind power and electric mobility as well as a broad range of electronics.

**Achieving Competitiveness with Limited Resources**

The optimal utilization of limited resources is of superior importance for a guaranteed and long-term technology success. In order to preserve competitiveness, intelligent and environmentally friendly solutions are fundamental to cope material streams, which are increasingly complex and low in valuable content. Only economic metal recycling with maximum resource efficiency serves the purpose of sustainability. If that case is not viable, critical metals have to be replaced. In general, there is insufficient knowledge about the economically relevant value chains, which interconnect in complex ways. A wide range of disciplines can counteract this shortcoming, such as raw material exploration, processing, metal extraction, materials production, and waste treatment. One future challenge will be to efficiently and simulta-

neously return metals with different properties into the cycle of materials. A key aspect is the necessity of sustainable solution strategies, meaning that ecological, economic, as well as social aspects must be taken into account. Apart from addressing questions of legal compliance, it becomes essential to increase awareness of environmental concerns and to positively affect consumer behavior. Only if end-of-life products such as disused smartphones, which include valuable metals, are returned into the cycle of materials by the consumer, a resource-efficient recycling economy can be realized.

In interdisciplinary and application-oriented research projects, scientists at RWTH Aachen University are creating visions and solutions in the areas of raw materials and recycling. The contributions in this edition of RWTH THEMEN illustrate the broad range of research conducted around this topic.

---

**Author**

Professor Dr. Dr. h.c. Karl Bernhard Friedrich is Chair of Process Metallurgy and Director of the Department of Process Metallurgy and Metal Recycling.

---

# Rohstoffe und Recycling sichern Produktion

## Interdisziplinäre Forschung rund um Lagerstätten, Aufbereitung, Produktion und Abfallbehandlung

Der wirtschaftliche Erfolg Deutschlands und anderer europäischer Länder beruht auf der Fähigkeit, in kurzen Zyklen Spitzenprodukte zu erzeugen und weltumspannende Wirtschaftsbeziehungen langfristig aufzubauen. Derartige innovative und umweltfreundliche Technologien sind jedoch nur solange realisierbar, wie die benötigten Materialien und Energieträger in ausreichender Menge und zu vertretbaren Kosten zur Verfügung stehen.

Schon jetzt ist die Hebelwirkung wirtschaftsstrategischer Metalle groß. So können in vom Rohstoffimport abhängigen Volkswirtschaften wie Deutschland bei einem Versorgungsengpass ganze Wertschöpfungsketten lahmgelegt werden. Dies betrifft beispielsweise die Seltenen Erdoxide, die essenzieller Bestandteil bei den „green technologies“ Windkraft und Elektromobilität sowie im Elektronikbereich sind.

### **Mit limitierten Ressourcen Wettbewerbsfähigkeit erhalten**

Die optimale Nutzung limitierter Ressourcen ist für einen langfristigen Technologieerfolg von besonderer Bedeutung. Zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit sind intelligente, umweltgerechte Lösungen erforderlich, um immer komplexere und dabei wertstoffärmere Rohstoffe zu verarbeiten. Im Sinne der Nachhaltigkeit beinhaltet eine Strategie zur Maximierung von Ressourceneffizienz stets ein wirtschaftlich funktionierendes Metallrecycling. Alternativ ist lediglich die Substitution produktkritischer Metalle möglich.

Das Wissen um die wirtschaftlich relevanten und äußerst komplex vernetzten Wertschöpfungsketten ist insgesamt unzureichend. Verschiedene Disziplinen wie Rohstoffexploration, Aufbereitung, Metallextraktion, Werkstoffproduktion bis hin zur Abfallbehandlung sind hier gefordert. Herausforde-

rungen für die Zukunft liegen darin, Metalle unterschiedlicher Eigenschaften gleichzeitig und effizient in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen. Nachhaltige Lösungsstrategien müssen die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte berücksichtigen. Neben Fragen der Rechtskonformität sind auch in steigendem Maße die Umweltsensibilisierung der Bevölkerung und die Beeinflussung des Verbraucherverhaltens zu verstärken. Nur wenn End of Life-Produkte wie ausgediente Smartphones mit ihren wertvollen Metallinhalten vom Verbraucher zurückgeführt werden, kann ein Recycling ressourceneffizient realisiert werden.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der RWTH Aachen entwickeln in interdisziplinären und anwendungsorientierten Forschungsprojekten Visionen und Lösungen im Themenfeld Rohstoffe und Recycling. Die Beiträge dieser Ausgabe der RWTH THEMEN zeigen die Forschungspalette.

---

### Autor

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Karl Bernhard Friedrich ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, er leitet das Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie.

---





VSG 100

# Lassen sich Mangan- knollen im Pazifik wie Kartoffeln ernten?

Tiefseebergbau gewinnt Hochtechnologierohstoffe

Natural mineral resources are a key factor of global economies and societal progress. In order to minimize supply risks for import-dependent countries such as Germany, unrestricted access to such resources needs to be ensured. It is well known that high-technology metals such as indium, germanium, rare earth elements and cobalt, which are crucial for future technologies such as renewable energy and electric mobility, are enriched in rocks in the deep oceans. There are currently three types of deep sea resources known which contain different value metals: Manganese nodules, massive sulphides and cobalt crusts. Manganese nodules occur in deep sea areas between depths of 3,500 and 6,500 m, mainly in the Pacific and Indian Oceans. They are formed by an ultra-slow (millions of years) metal concentration process from seawater and seafloor sediment. Massive sulphides are metal concentrations which form at seafloor spreading centers in the deep oceans worldwide. Research in the last decades, also

at RWTH, has unraveled remarkable metal distributions and grades and has tested initial extraction concepts. Germany plays a crucial role in marine research, in particular in marine surveying, extraction and processing technologies. About 380,000 employees and a turnover of 50 billion Euros confirm the economic importance of the marine sector in Germany. Three central challenges need to be addressed by deep sea mining concepts: Environmentally sensible extraction, technological integration into a common process applicable to large water depths, and production at an acceptable economic cost. In the past two years, four EU-projects – Blue Mining, Blue Nodules, Midas, iVAMOS! – have revitalized research in Europe to develop new concepts for sustainable exploration, extraction and processing in the deep oceans. RWTH scientists and engineers are key partners in the Blue Mining and Blue Nodules projects.

Die natürlichen Vorkommen von mineralischen Ressourcen sind essenziell für die Entwicklung globaler Ökonomien und damit den gesellschaftlichen Fortschritt. Im Rahmen der technologischen Entwicklung steigt der Bedarf an so genannten Hochtechnologiemetallen stetig an, wodurch die Abhängigkeit von deren Verfügbarkeit und damit auch die politischen Rahmenbedingungen in den Vordergrund rücken. Um Versorgungsrisiken zu minimieren, ist es Ziel der Industrienationen, einen konstanten und risikofreien Zugang zu Wertrohstoffen, für die in Deutschland eine nahezu gänzliche Importabhängigkeit besteht, zu gewährleisten. Mineralische Rohstoffe an Land werden bereits seit vorchristlicher Zeit abgebaut. Moderne Explorationsmethoden führten in den vergangenen Jahrzehnten zur Entdeckung großer Lagerstätten für Bunt-, Leicht- und Edelmetalle sowie der Stahlveredler. Gleichzeitig gewährleisten moderne Abbaumethoden einen effizienten Abbau der Vorkommen und führten zur Konzentration auf Großlager-



Bild 1: Manganknollen aus dem deutschen Lizenzgebiet.  
Foto: Peter Winandy

stätten, die jedoch eine starke Landnutzung und Umweltbeanspruchung nach sich zieht. Deshalb wurden in der Vergangenheit die Meere nach mineralischen Ressourcen erkundet. Vor allem Hochtechnologiemetalle wie Indium, Germanium, Seltene Erden und Kobalt werden für Zukunftstechnologien in den Bereichen Erneuerbare Energien und Elektromobilität in großen Mengen benötigt. Seltene Erden sind essenzieller Bestandteil bei den grünen Technologien Windkraft und Elektromobilität sowie im Elektronikbereich. Modellszenarien des Öko-Instituts zeigen, dass bei einer ambitionierten Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen der Bedarf an Seltenen Erden die bekannten Reserven übersteigt. Sie sind, ebenso wie die anderen Hochtechnologiemetalle in sehr geringen Gehalten von wenigen Milligramm bis Gramm pro Tonne in Gesteinen enthalten, aber in den marinen Ressourcen um ein Vielfaches angereichert. Die bekannten Vorkommen dieser Metalle an Land sind geographisch sehr ungleich verteilt – etwa 90 Prozent der

Reserven befinden sich auf chinesischem Hoheitsgebiet.

Die Bedeutung der genannten Ressourcen für Deutschland wird durch die Aufnahme der maritimen Wirtschaft in die Hightech-Strategie der Bundesregierung im Jahr 2015 deutlich. Gleichzeitig wurde eine Absichtserklärung für eine stärkere Zusammenarbeit zwischen Frankreich und Deutschland beim Thema Tiefseebergbau unterzeichnet. Die maritime Wirtschaft ist mit mehr als 380.000 Beschäftigten und einem jährlichen Umsatz von rund 50 Milliarden Euro einer der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland – und wirkt damit weit über die Küstenregionen hinaus. Vor einem kommerziellen Abbau sind laut Bundesverband der Deutschen Industrie und Bundesregierung drei Herausforderungen zu lösen: Der umweltverträgliche Abbau der Rohstoffe, das Zusammenfügen der verschiedenen einzelnen Technologien zu einem Gesamtprozess, der in großer Wassertiefe einsetzbar ist, und nicht zuletzt die Produktion zu wirtschaftlichen Kosten.

In der Tiefsee sind drei Typen von Rohstoffvorkommen bekannt, die unterschiedliche Wertmetalle enthalten: Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfide. Manganknollen sind bis zu kartoffelgroße Mineralanreicherungen, die große Bereiche der Tiefsee-Ebenen in 3.500 bis 6.500 Meter Wassertiefe vorwiegend im Pazifik und im Indischen Ozean bedecken. Forschungen der letzten Jahrzehnte – auch in der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der RWTH Aachen – stellten besonders interessante Metallverteilungen und -gehalte dieser Ressource fest. Dies ist der Grund, warum nach dem Ende der letzten Forschungs- und Erkundungsphase in den 1970er und 1980er Jahren, in der auch an der RWTH erste Abbaukonzepte mit der Industrie erforscht und auch erstmalig getestet wurden, die marine Ressourcenforschung in Deutschland und europaweit eine Renaissance erfahren hat. In den vergangenen zwei Jahren wurden die vier EU-Projekte „Blue Mining“, „Blue Nodules“, „Midas“, „iVAMOS!“ eingerichtet,

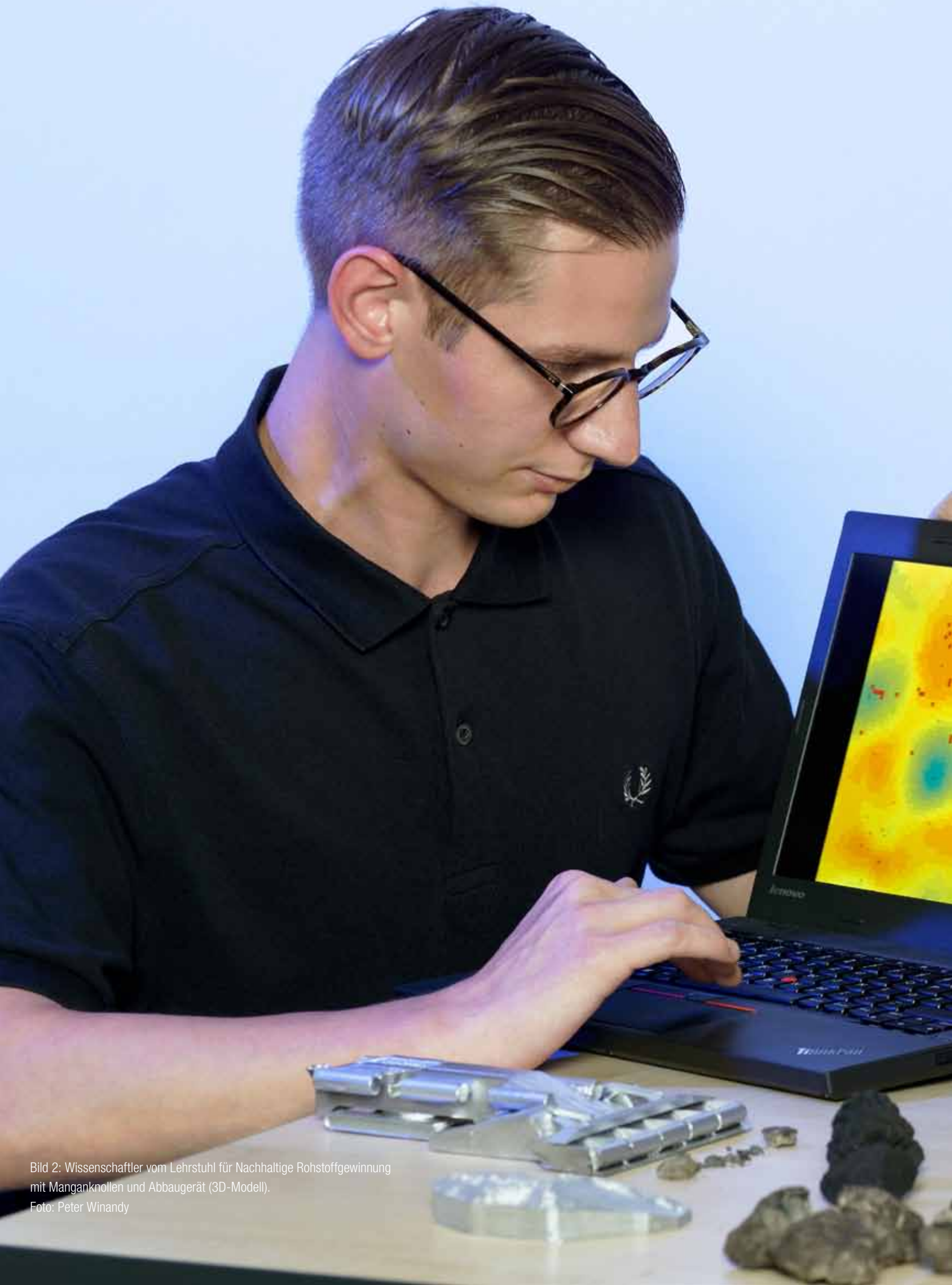


Bild 2: Wissenschaftler vom Lehrstuhl für Nachhaltige Rohstoffgewinnung mit Manganknollen und Abbaugerät (3D-Modell).  
Foto: Peter Winandy



die die nachhaltige Erkundung, Gewinnung und Verarbeitung von Manganknollen und Massivsulfiden untersuchen sollen. An den Projekten Blue Mining und Blue Nodules sind RWTH-Wissenschaftler maßgeblich beteiligt. Im Arbeitspaket des Blue Mining-Projekts werden innovative technische Lösungen zum nachhaltigen Abbau von Manganknollen am Meeresboden sowie wirtschaftliche Machbarkeitsstudien erstellt.

Neben den Manganknollen sind auch die Massivsulfiderze Ziel der Untersuchungen im Blue Mining-Projekt. Diese gehen auf Metallanreicherungen an Austrittsstellen heißer Fluide im Bereich großer Spreizungszonen am Meeresboden zurück. Tief im Meeresboden zirkulierendes Wasser heizt sich auf mehrere hundert Grad Celsius auf und löst dabei metallhaltige Mineralien aus dem

Gestein. Massivsulfide finden sich in Ozeanen, die vulkanisch aktiv sind. Vergleichbare Anreicherungen kommen in älteren, vormalig ozeanischen Schichten vor und stellen einen signifikanten Anteil an den weltweiten Rohstoffressourcen an Land dar. Abhängig von regionalen Gegebenheiten enthalten die Massivsulfide unterschiedliche Anteile an Kupfer, Zink, Blei, Gold und Silber sowie an zahlreichen wichtigen Spurenmetallen wie Indium, Germanium, Tellur oder Selen. Mit numerischen Methoden werden im Blue Mining-Projekt Lagerstättenmodelle erstellt, die als Basis für einen nachhaltigen und wirtschaftlichen Abbau dienen.

Nachdem ein Großteil der Tiefsee-Metallressourcen in internationalen Gewässern liegt, ist die International Seabed Authority mit Sitz in Kingston/Jamaica für Regularien

zuständig. Unter ihrer Federführung sollen in den kommenden Jahren die gesetzlichen Rahmenbedingungen für einen marinen Bergbau aufgestellt werden. Dies beinhaltet vor allem auch ein gerechtes Verteilungsmodell der Gewinne unter den Anrainerstaaten. Deutschland hat Lizenzgebiete zu Untersuchungszwecken für Manganknollen im Pazifik und für Massivsulfide im Indischen Ozean zugesprochen bekommen. Hier werden modernste Erkundungsverfahren durch die marinen Forschungsinstitutionen Geomar, Kiel, und Marum, Bremen, sowie durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe durchgeführt. Der Rohstoffwert der deutschen Lizenz für Manganknollen wird aktuell auf etwa 40 Milliarden US-Dollar geschätzt. Diese Gebiete stellen somit auf Grund der dort bereits erkundeten bezie-

Bild 3: Aufgeschnittene Manganknolle mit mineralischen Gehalten.

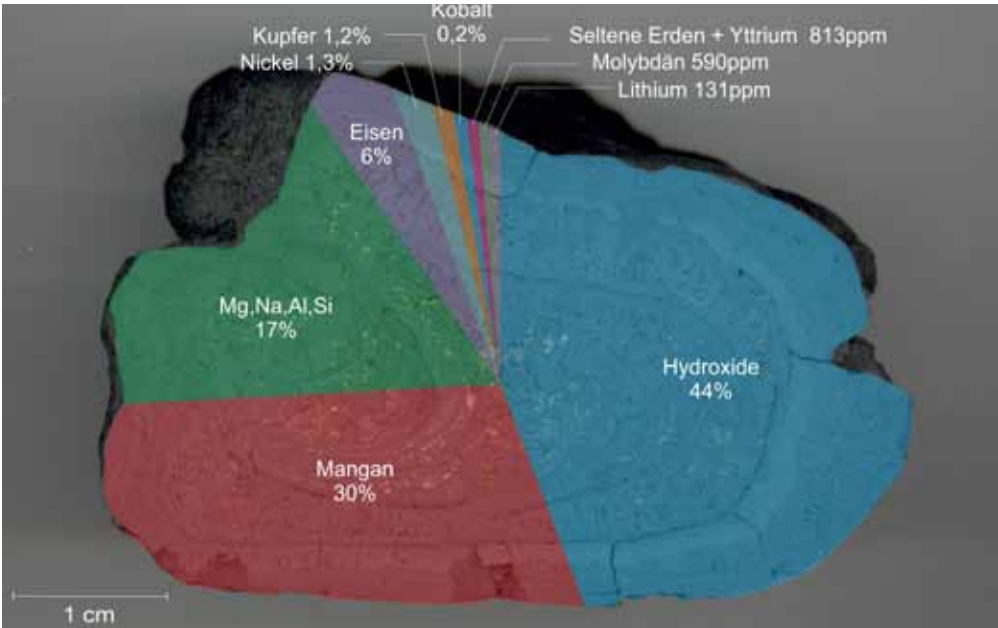
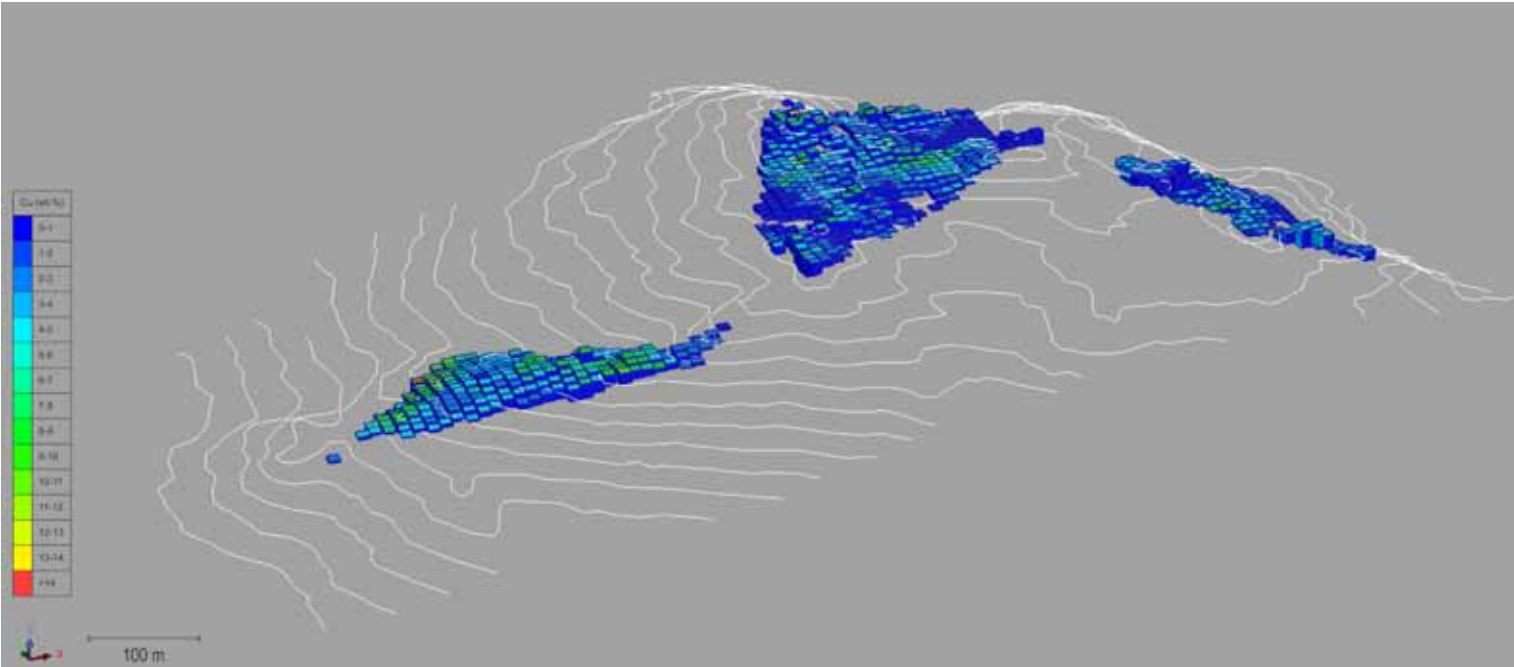


Bild 4: Lagerstättenmodell (Kupfer-Gehalt und Struktur) eines typischen Massivsulfidvorkommens.



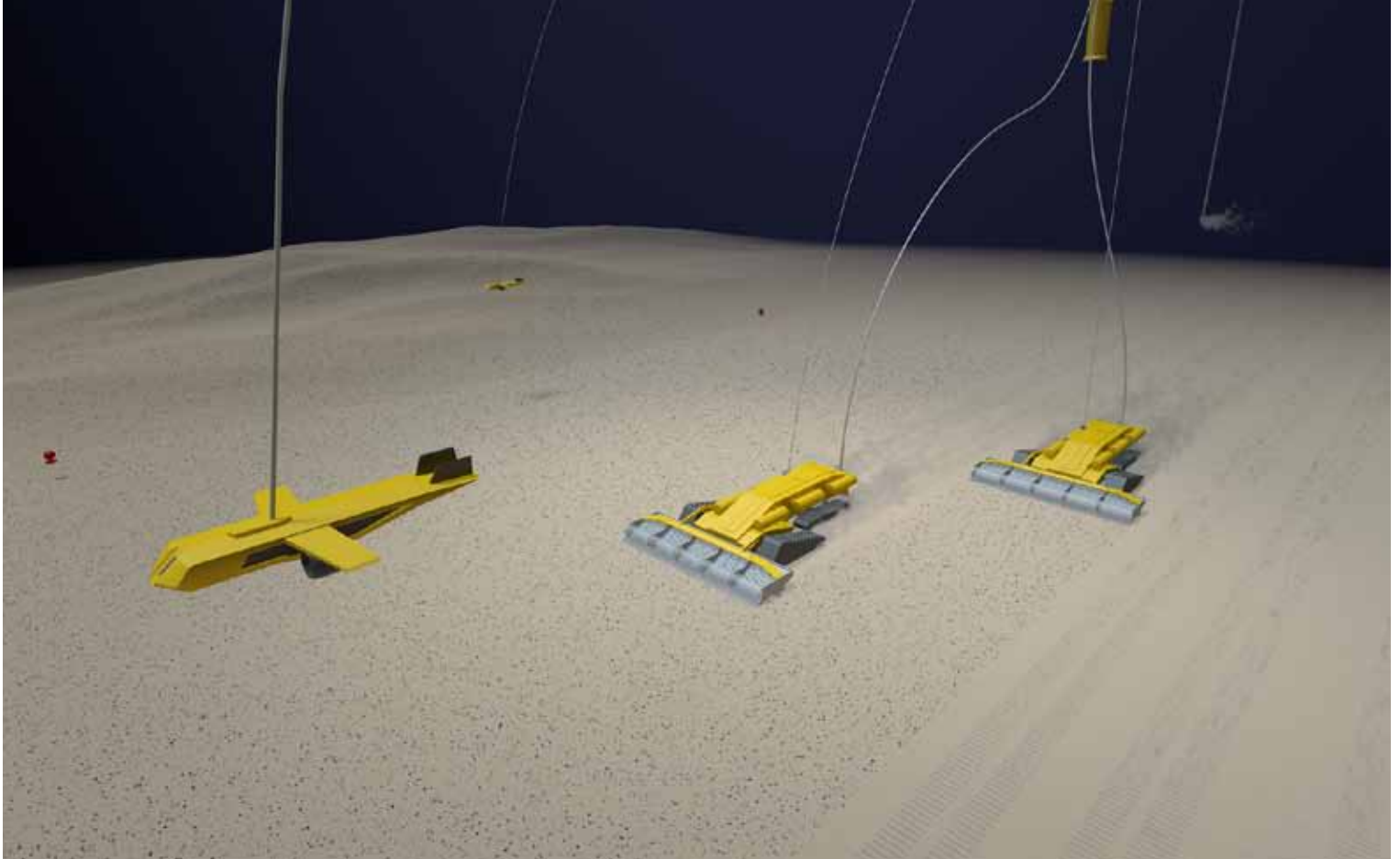


Bild 5: Technisches Konzept zur Förderung von Manganknollen aus der Tiefsee. (3D-Animation)  
Quelle: Sebastian Volkmann, RWTH

hungsweise vermuteten Metallreserven einen strategischen Wert für die deutsche Volkswirtschaft dar.

Um einen wirtschaftlichen, nicht subventionierten Abbau von Manganknollen zu gewährleisten, müssten unter Berücksichtigung aktueller Produktionsfaktoren und Marktpreise jährlich etwa anderthalb bis zwei Millionen Trockentonnen an Wertmineral gefördert werden. Die Produktionskapazität ist aufgrund der geologisch vorgegebenen Belegungsdichte und der in dieser Zeit abbautechnisch zu bewirtschaftenden Fläche auf etwa zwei Millionen Trockentonnen pro Abbausystem beschränkt.

Die Firma MH Wirth hat ein solches Abbaukonzept entwickelt: Es sieht vor, dass die oberflächlich vorkommenden Manganknollen von ein bis zwei ferngesteuerten Sammelgeräten aufgenommen, von Sediment befreit und für den vertikalen Transport zerkleinert werden. Die Maschinen sind so gestaltet, dass ein möglichst geringer Eingriff in die Natur erfolgt. Der Abbauvorgang und die Umweltauswirkungen in der Tiefsee sind noch nicht hinreichend genau erforscht. Es wird erwartet, dass der Abbau am Meeresboden ähnlich wie der Prozess der Kartoffelernte in der Agrarwirtschaft erfolgen wird. Dabei wird angenommen, dass im Durchschnitt vier bis fünf Fußballfelder pro Förderstunde bewirtschaftet werden müssen, um eine Jahrestonnage von zwei Millionen Trockentonnen zu erzielen. Das Abbaukonzept sieht zudem vor, dass der Abbau in der Tiefsee von

einer Vielzahl unterschiedlicher ferngesteuerter Unterwasservehikel, unter anderem zur Erfassung und Bewertung der Befahrbarkeit der Meeresoberfläche und Bestands an Manganknollen, begleitet wird. Geeignete Technologien müssen allerdings noch (weiter) entwickelt werden. Aktuell werden im Rahmen der EU-Forschungsprojekte Blue Nodules und ¡VAMOS! – Viable Alternative Mine Operating System Lösungen in diesem Bereich erarbeitet.

Das so gesammelte Erz gelangt über einen flexiblen Förderstrang in einen Zwischenspeicher, der über das vertikale Förderrohr mit dem Produktionsschiff verbunden ist. Im Rahmen des Blue Mining Projekts werden zwei unterschiedliche Technologien erforscht: Zum einen ein in der Nassgewinnung von Industriemineralen weit verbreitetes, jedoch für eine Tiefe von bis zu 5.000 Meter verbessertes Pumpsystem und zum anderen ein von der Firma MH Wirth vorgesehenes Lufthebeverfahren. Auf dem Produktionsschiff wird das Erz entwässert, zwischengespeichert und in Intervallen von fünf bis acht Tagen auf Massengutfrachter für den lateralen Transport verladen. Meereswasser und Kleinstfraktionen an Sediment und Manganknollensubstrat aus der Entwässerung werden in ausreichende Wassertiefen rückgeleitet. Bisher gibt es noch keine Aufbereitungsanlagen für Manganknollen an Land. Um Versorgungsrisiken zu minimieren und eine umweltverträgliche Aufbereitung zu garantieren, empfiehlt sich daher die Aufbereitung der Manganknollen in

einem europäischen Land. Die Firma Nautilus Minerals hat bereits ein ähnliches Konzept zur Förderung von Massivsulfiden aus der Tiefsee entworfen und verfolgt eine industrielle Gewinnung dieses mineralischen Rohstoffs aus der Lagerstätte Solwara vor der Küste Papua-Neuguineas bis zum Jahr 2017. Die Abbaumethoden und Geräte unterscheiden sich vom Manganknollenabbau. Eine kommerzielle Gewinnung von Manganknollen ist aufgrund der unklaren Gesetzeslage, der derzeit niedrigen Marktpreise insbesondere der Metalle Kobalt, Kupfer, Nickel und Mangan sowie aufgrund der noch nicht ausgereiften Aufbereitungstechnologie bisher noch nicht absehbar.

## Autoren

Univ.-Prof. Peter Kukla, Ph.D. ist Inhaber des Lehrstuhls für Geologie und Paläontologie und Leiter des Geologischen Instituts. Univ.-Prof. Dr. Bernd Lottermoser ist Inhaber des Lehrstuhls für Nachhaltige Rohstoffgewinnung und leitet das Institut für Rohstoffingenieurwesen.

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Felix Lehnen ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Nachhaltige Rohstoffgewinnung und Work Package Leader im EU-Projekt „Blue Mining“.

Mirjam Rahn, M.Sc., ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Geologischen Institut, Sebastian Volkmann, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachhaltige Rohstoffgewinnung.

# Rehabilitation und Nachsorge von Bergbaulandschaften

## Entwicklung von ökologisch und sozial verträglichen Alternativen

The aspect of rehabilitation, a “maintenance” of degraded land in mining areas, gains more and more importance in the context of sustainable resource management of raw materials. Optimized rehabilitation of the site is regarded as an integrated component of the production chains. Rehabilitation reduces the occupation of land, reduces the risk potential and contributes substantially to the acceptance of the mining industry. With the methodology of a concept pyramid we discuss possibilities for a follow-up use of degraded land by the examples of the Nkana-Copper Mine (Zambia) and the Coal mines in Nalaikh (Mongolia). This also includes rehabilitation potentials and site-optimized rehabilitation concepts.

Der Aspekt der Rehabilitation von Bergbaufolgelandschaften, also einer Nachsorge, gewinnt im Kontext ressourcenschonender Rohstoffwirtschaft immer mehr an Bedeutung. Maßnahmen zur Rehabilitation sind mittlerweile Bestandteil von Produktionsketten. Eine Rehabilitation verringert die zeitliche Inanspruchnahme der Flächen, reduziert mögliche Gefahrenpotenziale und trägt erheblich zur Akzeptanz der Bergbauaktivitäten bei. An der Nkana-Kupfermine in Zambia und dem Kohlebergbau in Nalaikh in der Mongolei werden beispielhaft unter Anwendung einer Konzeptpyramide Möglichkeiten für eine Folgenutzung beanspruchter Flächen diskutiert und standortangepasste Rehabilitationskonzepte abgeleitet.

### **Renaturierung, Rekultivierung, Rehabilitation**

Zunächst müssen die Begriffe Renaturierung sowie Rehabilitation, Rekultivierung oder auch Stabilisierung abgegrenzt werden. Im deutschsprachigen Raum gibt es eine Vielzahl von Bezeichnungen, die versuchen, die Optimierung eines Raumes nach bergbaulichen Eingriffen zu beschreiben. Allerdings erfahren diese Begriffe nicht immer eine einheitliche Auslegung.

Nach verschiedenen Begriffsauslegungen können für die Renaturierung und Rekultivierung folgende Zielsetzungen abgeleitet werden:

- Das Endziel einer Renaturierung ist die Regeneration, also die Wiederherstellung typischer natürlicher Verhältnisse.
  - Rekultivierung hat zum Ziel, eine für den Menschen bestimmte naturgemäße Agrar-, Wirtschafts-, Siedlungs- oder Erholungslandschaft bestmöglich (wieder-)herzustellen.
- Als Oberbegriff für die beiden vorgenannten Begriffe wird der Begriff Rehabilitation verwendet, um auf einem höheren sprachlichen Integrationsniveau sowohl die natur- als auch kulturlandschaftlich orientierte Errichtung von Folgelandschaften zusammenzufassen. Die Rehabilitation bezeichnet demnach alle anthropogen gesteuerten Prozesse, die eine Aufwertung degradierter Areale zum Ziel hat. Sie beschreibt folglich auch den häufig verwendeten Begriff der Stabilisierung von Flächen. Stabilisierungsmaßnahmen sollen Gefahrenpotenziale infolge physikalischer oder chemischer Instabilität in Anspruch genommener Flächen vermeiden beziehungsweise reduzieren.

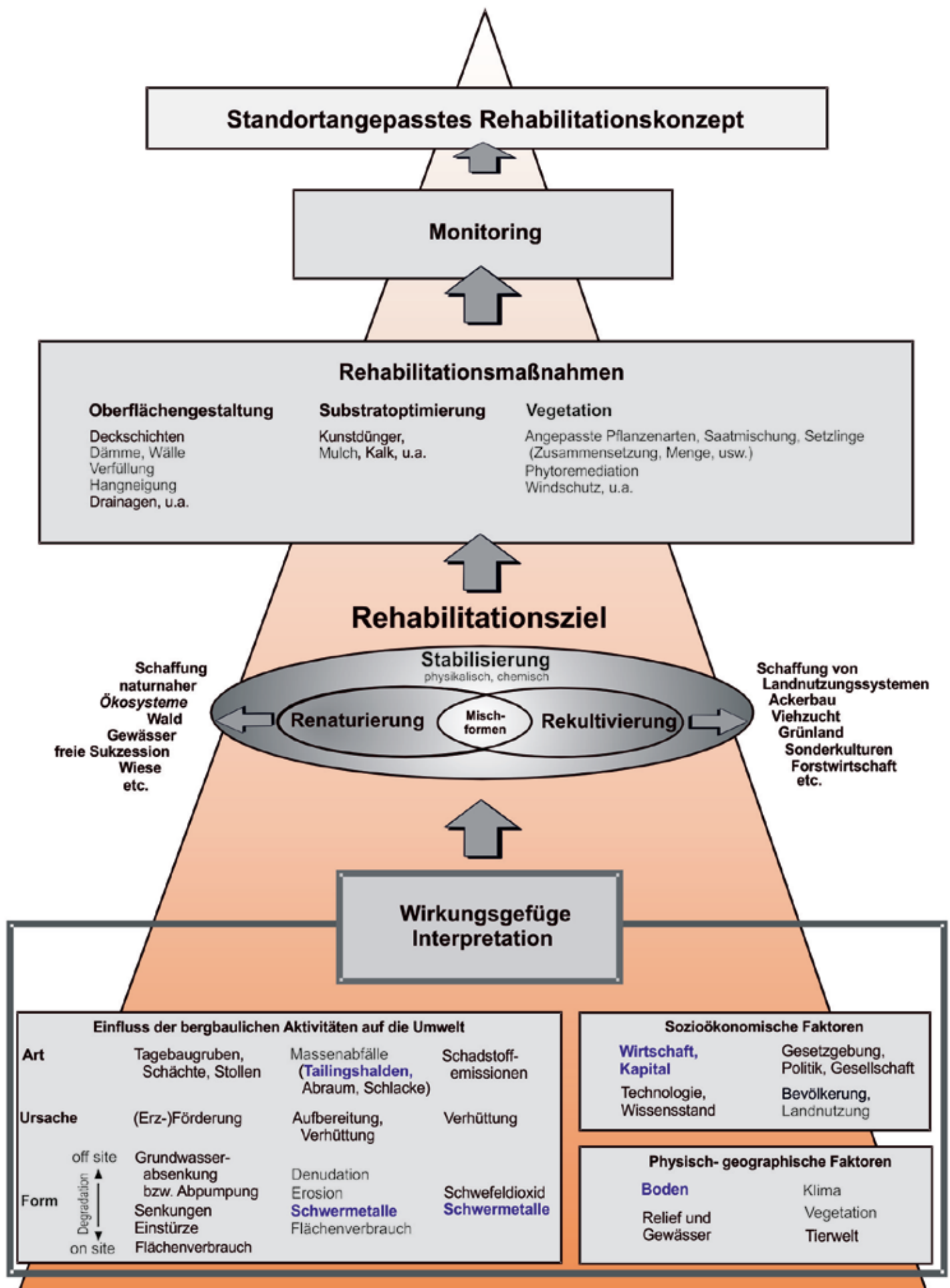


Bild 1: Konzeptpyramide zur Ableitung von Rehabilitationskonzepten, Knippertz, 2005.

**Die Konzeptpyramide**

Immer mehr Bergbauunternehmen sehen eine Rehabilitation als einen Bestandteil ihrer Tätigkeiten an. Die Ermittlung von Möglichkeiten und Perspektiven zur Rehabilitation beeinflusster Flächen im (Erz-)Bergbau wird durch zahlreiche Einflussfaktoren geprägt, die modellhaft in einer Konzeptpyramide dargestellt werden.

Das Modell sieht zunächst eine detaillierte Bestandsaufnahme aller Parameter vor, die das Rehabilitationspotenzial beeinflussen können, siehe Bild 1, untere Box. Über eine Interpretation des Wirkungsgefüges dieser Einflussfaktoren ergibt sich das Rehabilitationsziel in Form von Stabilisierung, Renaturierung oder Rekultivierung. Eine Realisierung wird durch eine spezifische Kombination von Rehabilitationsmaßnahmen ermöglicht. Das standortangepasste Rehabilitationskonzept wird schließlich durch ein geeignetes Monitoring komplettiert.

Bei der Betrachtung der Einflussfaktoren kommt der Untersuchung relevanter Bodenparameter eine herausragende Bedeutung zu: Der Boden stellt den entscheidenden ökologischen Faktor für die Bewertung des Rehabilitationspotenzials dar. An Bergbaustandorten insbesondere in Entwicklungsländern wird zudem die „low-income“-Situation berücksichtigt, die ökonomisch und sozial vertretbare Rehabilitationsempfehlungen besonders beachtet.

**Rehabilitationskonzepte im Kupferbergbau**

Der Nkana-Kupferkomplex liegt unweit der Stadt Kitwe im nördlichen Teil Zambias. Neben den drei aktiven Tiefbaubetrieben gehören zum etwa 12.000 Hektar großen Lizenzgebiet zwei inaktive Tagebaugruben, die Produktionsanlagen (Aufbereitung, Schmelzofen, Raffinerie), Aufbereitungsteiche und weitere Haldenkörper für die Abfallprodukte der verschiedenen Produktionsschritte. Neben den Emissionen des Schmelzofens stellen die Aufbereitungsteiche, die insbesondere beim Tiefbau zu den mengenmäßig bedeutendsten Abfällen der Produktionskette gehören, die größten Umweltbeeinträchtigungen des Produktionsprozesses dar. Der negative Einfluss auf die auch im Minenlizenzengebiet landwirtschaftlich genutzten Böden zeigt sich insbesondere durch stark erhöhte Schwefel- und Schwermetallgehalte. Als Rehabilitationsziel für die nicht mehr aktiven Aufbereitungsteiche scheiden eine Rekultivierung oder Renaturierung aus, auch wenn



Bild 2 und 3: Erosionserscheinungen auf einem Aufbereitungsteich, Aufbereitungsteich und Hüttenkomplex (im Hintergrund) im Nkana-Bergbaukomplex.  
Fotos: Geographisches Institut /Knippertz

sie technisch durchaus möglich erscheinen. Dem Ergebnis stünde jedoch ein unverhältnismäßig hoher Kapitaleinsatz gegenüber, der mit dem „low-income“-Ansatz keinesfalls vereinbar wäre. Als vorrangiges Ziel der Rehabilitationsmaßnahmen ist eine Stabilisierung zur Eindämmung der Erosion und Minimierung des Schwermetallflusses von den Aufbereitungsteichen auf die Felder empfohlen worden. Dies konnte unter anderem durch die Errichtung von Windschutzstreifen erreicht werden. Zudem wurde das Aufbereitungsma-terial durch lokal verfügbare Materialien wie Rinderdung oder Rohphosphat aufgewer-

tet, wodurch eine stabile Vegetationsdecke etabliert werden konnte. Im erweiterten Minenumfeld soll eine Kombination bodenverbessernder Maßnahmen besonders die Schwermetallmobilität minimieren. Die Schwermetalle können in den Böden gehalten werden, indem insbesondere der Wert der Bodenazidität, das Maß für die Bodenversauerung, angehoben wird und organische Substanzen, wiederum durch lokal und damit auch kostengünstig verfügbare Materialien, eingearbeitet werden. Das endgültige Ziel ist eine Rekultivierung des Bereiches.

**Rehabilitationskonzepte im Kohle-Kleinbergbau**

Der Kohlebergbau in Nalaikh – 35 Kilometer östlich der mongolischen Hauptstadt Ulaanbaatar – findet zumeist als illegaler Kleinbergbau in etwa 200 aktiven Kohleschächten auf einer Fläche von etwa 1.200 Hektar statt. Geschätzte 2.000 Ninja miners arbeiten unter sehr gefährlichen Bedingungen mit primitiven Abbaumethoden und geringem Einsatz von Maschinen zumeist nur im Winter, wenn der Boden gefroren und damit die Schächte „stabil“ sind. Die Kohle wird an diesem Standort nur gefördert, aber nicht

weiterverarbeitet. Die wesentliche Umweltauswirkung stellt der Landschaftsverbrauch dar. Eine hohe Staubbelastung resultiert bei den gegebenen klimatischen Bedingungen aus der Umlagerung und Aufhaltung von Abraummaterial. Die natürlicherweise sehr gute Bodenqualität wird durch die bergbaulichen Aktivitäten nur unwesentlich beeinträchtigt, lediglich die Arsen-Gehalte im Boden (und Wasser) zeigen erhöhte Werte. Vorrangiges Ziel einer Rehabilitation im Kohlgebiet von Nalaikh sollte eine Stabilisierung der Haldenkörper und die Sicherung des Untergrundes sein. Die Umsetzung wird

eine große Herausforderung darstellen, da sie zwangsläufig die Ninja miners, die zwingend auf das Einkommen aus dem Kleinbergbau angewiesen sind, in ihren Aktivitäten beeinträchtigen. Ein schon mehrfach angedrohtes Verbot des illegalen Bergbaus in Nalaikh konnte von den zuständigen Behörden bislang nicht durchgesetzt werden – wohl auch weil Beschäftigungsalternativen für die Ninja miners fehlen. Die Formalisierung des Kleinbergbaus als Lösungsansatz scheitert bislang daran, dass in der Mongolei noch keine entsprechende Institution etabliert ist, die einen adäquaten Rechtsrahmen schaffen und ein effizientes Monitoring gewährleisten kann. In einem aktuellen Projekt muss am illegalen Kleinbergbaustandort Nalaikh bei der Ableitung geeigneter Rehabilitationsmaßnahmen die sozio-ökonomische Komponente eine zentrale Stellung einnehmen.

Bild 4 und 5: Illegaler Kohle-Kleinbergbau im mongolischen Nalaikh.  
Fotos: Geographisches Institut /Knippertz



**Autoren**

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Frank Lehmkuhl ist Inhaber des Lehrstuhls für Physische Geographie und Geoökologie.  
Dr.rer.nat. Martin Knippertz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Physische Geographie und Geoökologie.







Felix Lehnen, Bernd Lottermoser

# Sicher gewinnen

## Wie sich Rohstoffe gefahrloser abbauen lassen

Sustainable production of mineral raw materials requires state-of-the-art occupational health and safety. Research and education at RWTH Aachen University meet this challenge. The projects RAME and I<sup>2</sup>Mine are two examples of successful research activities increasing awareness and preparedness world-wide. Furthermore, graduates of RWTH Aachen's Mineral Resources Engineering BSc and MSc programs are trained to meet safety challenges in their future professional lives. Thus, both research and education at the Institute of Mineral Resources Engineering (MRE) contribute to improving health and safety in the mining industry.

Dark, dirty, dangerous? Auch im 21. Jahrhundert wird Bergbau von vielen Menschen als dunkle, schmutzige und gefährliche Industrie wahrgenommen. Dabei weist die Gewinnung mineralischer Rohstoffe heutzutage in Europa und in vielen anderen Ländern Unfallzahlen auf, die nicht höher als in anderen Industriezweigen liegen. Die sicherheitstechnische Gestaltung eines Bergwerkes als Arbeitsplatz ist besonders herausfordernd: Die Arbeitsbedingungen unter Tage können sich schnell mit dem voranschreitenden Abbau ändern. Hinzu kommt eine künstliche Beleuchtung und Belüftung sowie eine starke Staub- und Lärmbelastung

der Arbeiter durch den Abbau und die dafür eingesetzte Technik. Besonders der Kleinbergbau in Entwicklungsländern aber auch in China macht weiterhin Negativschlagzeilen, wenn es um Arbeitssicherheit geht. Die Gefahren im Kleinbergbau sind weitestgehend identisch mit denen aus großen Betrieben. Zusätzlich ist der Arbeiter im Kleinbergbau aber Chemikalien wie Quecksilber oder Zyanid, auch Überanstrengung, sehr beschränkten Arbeitsräumen und ungeeigneter Ausrüstung ausgesetzt. Die Hauptgefahren im Kleinbergbau gehen von Steinfall, Erstickungsgefahr durch fehlende Belüftung, dem Missbrauch von Sprengstoff und nicht



Bild 1: Mit Studierenden  
unter Tage.  
Foto: Peter Winandy

zuletzt von mangelhafter Ausbildung oder Vorschriftenverstößen aus. Eine entgegenwirkende staatliche Kontrolle findet oftmals nicht statt. Auch durch die Implementierung neuer Technologien steigt das Gefahrenpotenzial im Kleinbergbau drastisch, da diese nicht immer mit einer Weiterqualifizierung des Personals einhergeht. Besonders für rohstoffreiche Entwicklungsländer werden sich große Herausforderungen ergeben, die ihre mineralischen und fossilen Ressourcen im Spannungsfeld einer wachsenden Bevölkerung mit steigendem Wohlstandsanspruch sowie größeren Bedürfnissen an Wasser, Energie und Nahrungsmitteln erschließen

wollen. Hier ist auch die Arbeitssicherheit ein wichtiger Ansatzpunkt für eine nachhaltige Rohstoffgewinnung.

Die Belastungen, denen die Bergleute ausgesetzt sind, können sich durch das Entstehen von Berufskrankheiten bemerkbar machen. Zu diesen gehört die Silikose, sie entsteht durch das Einatmen von Staub aus quarzhaltigem Gestein. Heutzutage ist diese Gefahr durch moderne Abbauprozesse und -technologien in westlichen Ländern stark gemindert. Dazu gehört die Staubbildung durch Wasser direkt an der Abbaustelle, aber auch die räumliche Trennung von staubbelasteter Luft und den Arbeitern durch eine dementprechende Wetterführung, isolierte Fahrzeugkabinen oder durch den Einsatz von persönlicher Schutzausrüstung wie Staubmasken. Diese Verfahren und Technologien sind jedoch in Entwicklungsländern weitestgehend nicht verfügbar und die Silikose bleibt dort ein ernstzunehmendes Problem.

Im Forschungsprojekt Research Association Mining and Environment RAME wurde die Staub-Problematik im vietnamesischen Steinkohlenbergbau erforscht. Der Tagebau liegt unweit des UNESCO-Weltkulturerbes Ha Long Bay. Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung wurden Konzepte zur Stabilisierung von Halden einerseits sowie Staubbindermaßnahmen andererseits entwickelt. Hierzu arbeitete der Lehrstuhl für Nachhaltige Rohstoffgewinnung zusammen mit deutschen Ingenieurbüros und vietnamesischen Bergbauunternehmen. Aus dem Projekt ging ein System zur Entscheidungsfindung in der Staubbekämpfung hervor. Es verdeutlicht Bergbaubetreibern die Entstehung von Staub und zeigt mögliche Gegenmaßnahmen auf. Mit Hilfe dieses Tools kann die Entstehung des Staubs abhängig von verschiedenen Faktoren berechnet werden. Einflussfaktoren von Staub sind zum Beispiel eingesetzte Maschinen, geologische Eigenschaften des geförderten Materials und auch klimatische Bedingungen wie beispielsweise Wind. Methoden zur Staubbekämpfung werden ebenfalls aufgezeigt und deren Kosteneffizienz für den Unternehmer kalkuliert. Neben solchen präventiven Ansätzen zur Abwehr von Gesundheitsgefahren erfordert der Bergbau auch gelegentlich die Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse. Im Projekt

I<sup>2</sup>Mine, gefördert von der Europäischen Union, wurden Konzepte und Technologien für das intelligente Bergwerk der Zukunft in besonders großen Tiefen entwickelt. In einem Netzwerk von 27 Partnern aus zehn Ländern wurden Forschungsfragen speziell zur Rettung verschütteter Bergleute gelöst.

Das „Wunder von Lengede“ oder auch die Rettung der 33 Bergleute in Chile 2010 sind noch im Gedächtnis. Projiziert man diese Situation auf den Trend von immer tieferen Bergwerken, so ergibt sich hier ein dringender Forschungsbedarf. Am Lehrstuhl für Nachhaltige Rohstoffgewinnung wurde ein Managementsystem entwickelt, das eine komplexe und lang andauernde Rettungsmission bestmöglich organisieren kann – vom Einsatz spezieller Bohrgeräte bis hin zur Betreuung von Familienangehörigen und Medienvertretern. Zusätzlich wurde ein Prototyp einer internetbasierten Plattform entwickelt, die die europäische Zusammenarbeit im Grubenrettungswesen stärken soll. Im technischen Bereich entstand in Kooperation mit der nordschwedischen Lulea University of Technology ein Konzept für innovative Rettungskammern. Diese bieten Bergleuten in havarierten Bergwerken einen sicheren Zufluchtsort.

Zu den betrieblichen Aufgaben eines modernen Bergwerks und zu den staatlichen Aufgaben im Rohstoffsektor gehört der Arbeitsschutz. In vielen Ländern erschwert aber die unzureichende Ausbildung der Bevölkerung eine moderne Arbeitssicherheit. Hier gilt es, die staatlichen Institutionen zu stärken. Die Aufsichtsbehörden müssen in der Lage sein, ihren Aufgaben effektiv nachzukommen. Somit lenkt die ansteigende globale Rohstoffnachfrage den Blick zunehmend auf die Ausbildung von Fachkräften für eine nachhaltige Rohstoffgewinnung.

## Autoren

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Felix Lehnen ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Nachhaltige Rohstoffgewinnung.

Univ.-Prof. Dr. Bernd Lottermoser ist Inhaber des Lehrstuhls für Nachhaltige Rohstoffgewinnung und Leiter des Instituts für Rohstoffingenieurwesen.

# Geometallurgie bewertet Rohstoffe

## Prozessoptimierung entlang der Wertschöpfungskette kritischer Metalle

Geometallurgy is a cross disciplinary approach along the value chain from mineral to metal, combining mineralogical, beneficiation, and metallurgical data with the aim of examining and defining mineral characterization to improve mineral processing and mining operation. Based on a comprehensive quantitative mineralogical data set all parameters that have an impact on the process chain are evaluated to optimize resource efficiency, reduce energy consumption, and enhance economic benefit. This is particularly important for the sustainable production of critical high-tech metals (e.g. In, Te, Bi, Nb, Ta, REE) that are essential for technological progress and which are characterized by a high risk for supply shortage. Applying geometallurgical techniques is particularly rewarding for high-tech metal ores, as they tend to occur in complex polymetallic deposits.

Geometallurgie ist die interdisziplinäre Vernetzung zwischen Mineralogie, Rohstoffingenieurwesen und Metallurgie, sie ist ausgerichtet auf die Bewertung und Optimierung aller Prozesse entlang der Wertschöpfungskette mineralischer Rohstoffe. Quantitative mineralogische Parameter kontrollieren zahlreiche prozessrelevante Rohstoffeigenschaften und bilden daher die zentrale Grundlage für die Konzipierung effizienter sowie ökonomisch und ökologisch verantwortungsvoller Schritte zur Rohstoffgewinnung. Dies ist für die nachhaltige Gewinnung kritischer Metalle von Bedeutung, da diese essenziell für die Entwicklung von Zukunftstechnologien sind und bei ihnen das Risiko einer unterbrochenen Versorgungskette besteht. Kritische Metalle von wirtschaftsstrategischer Bedeutung wie Indium, Tellur, Bismut, Niob, Tantal und Seltene Erden sind häufig in komplexen polymineralischen Lagerstätten zu finden. Ihre Nutzung erfordert moderne geometallurgische Ansätze, die am Lehrstuhl für Angewandte Mineralogie und Lagerstättenlehre erforscht werden.

### Was verrät der Blick auf ein Erzhandstück?

Erzminerale sind auf den ersten Blick sichtbar. Da man ihre Zusammensetzung kennt, ist auch der Metallgehalt und damit deren Wert bekannt. Bedenkt man aber, dass ein mineralischer Rohstoff den Anfang einer Prozesskette „from mineral to metal“ darstellt, ist eine weitere Betrachtung erforderlich.

Beim Blick durch das Elektronenmikroskop offenbaren sich eine Vielzahl von stofflichen und textuellen Eigenschaften. Diese werden als quantitative mineralogische Datensätze erhoben und umfassen Modalbestand, Korngrößenverteilung, Mineralassoziationen sowie Formparameter zur Charakterisierung von Erzphasen und ihren Verwachsungen. Die Kenntnis dieser mineralogischen Parameter ist für die Wertschöpfung von grundlegender Bedeutung. In der nachfolgenden technischen Prozesskette wird aus dem Erz durch Zerkleinerung, Mahlung und weitere Anreicherungsschritte ein höher-konzentriertes, vermarktbare Produkt. So ist für eine energieeffiziente Aufbereitung der Erze eine Zerkleinerung auf Korngrößen erforderlich, die eine mechanische Trennung der einzelnen Minerale ermöglichen. Wichtig ist die Ermittlung der optimalen Korngrößen, da die Zerkleinerung der energieintensivste Verfahrensschritt einer Aufbereitung darstellt. Einerseits muss eine Reduzierung der Zerkleinerungsenergie und andererseits die Verminderung der Übermahlung zu nicht mehr aufbereitablem Feinstgut erreicht werden.

Die enge Verwachsung eines Erzminerals mit einem Mineral, das ein radioaktives Element wie Uran oder Thorium enthält, kann hohe Aufwändungen bei der Gewinnung erfordern. Dieses Beispiel zeigt, dass Erze mit hohem Wertelementgehalt, die aber mit (Schad-) Mineralen vergesellschaftet sind, höhere Gewinnungskosten verursachen. Ihr Aufberei-

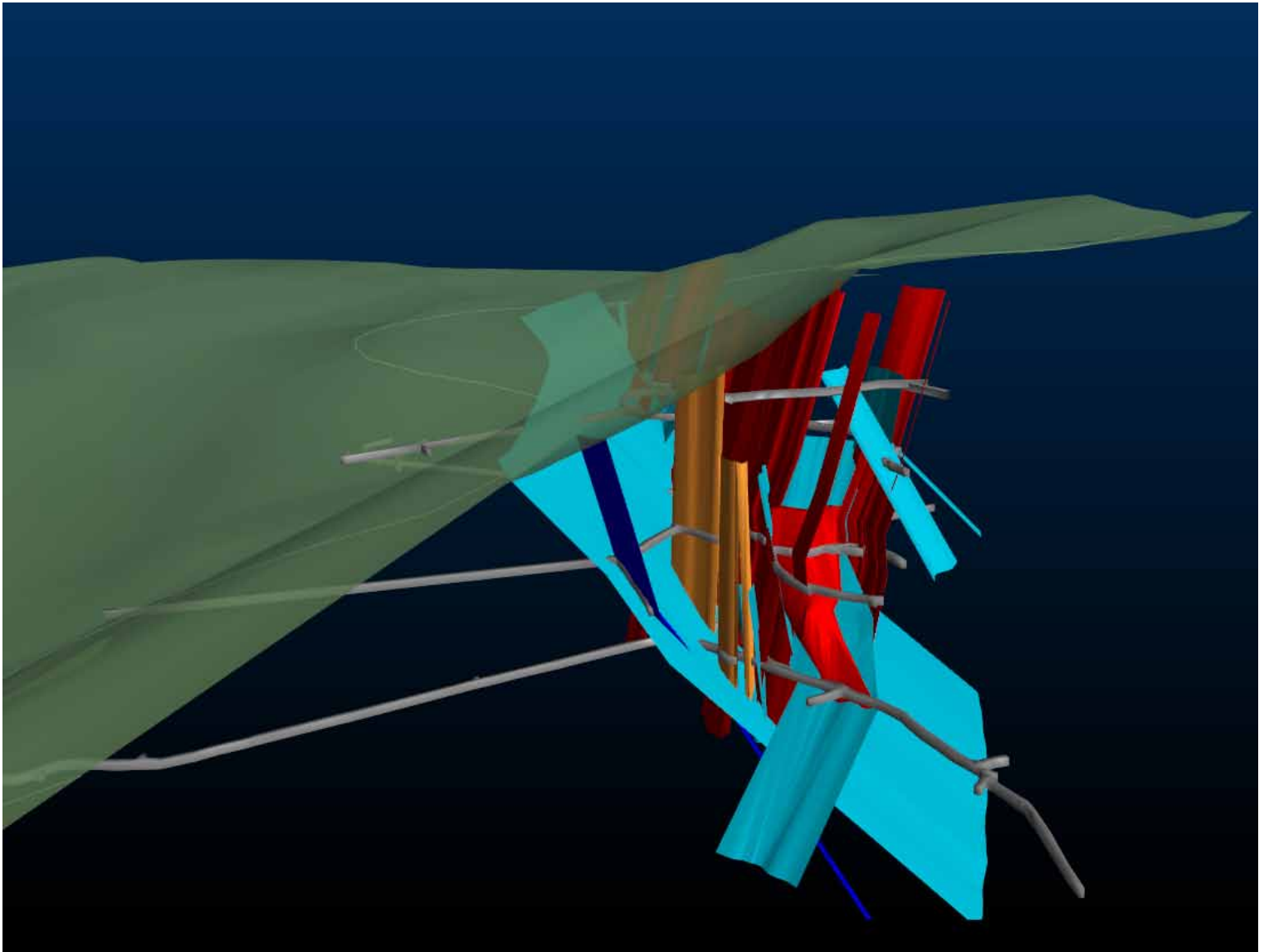


Bild 1: Geometrisches 3D-Modell einer komplexen Vererzung unter der Geländeoberfläche (grün): Kobalt- und Kupfererz führende reaktivierte Siderit-Quarzgänge (rot), Kobalt-erz führende Quarzgänge (blau), Schrägaufschiebungen (hellblau) und Kupfererz reiche Quarzgänge (orange). Bergwerksstollen (grau).

tungsprozess wird dadurch erschwert und verteuert. Demnach wird der Wert eines Erzes nicht nur über die Metallkonzentration, sondern auch über die mineralogische Zusammensetzung bestimmt. Auch solche Sachverhalte können durch die quantitative Mineralogie zum Ausdruck gebracht werden.

Der zweite Blick auf das Erz bietet somit eine umfassende Grundlage für die effiziente, ökonomisch und ökologisch verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung, sofern die quantitativ mineralogischen Informationen mit Sachkenntnis über die gewinnungstechnischen und metallurgischen Schritte in der Prozesskette verknüpft werden. Dieses neue interdisziplinäre Feld, in dem geowissenschaftliches und ingenieurwissenschaftliches wie auch betriebswissenschaftliches Wissen

zusammengeführt werden, ist die Geometallurgie.

Sie ist somit ein Bestandteil der Rohstoffprozesskette und trägt insbesondere im Frühstadium einer Bergbauunternehmung dazu bei, das technische und wirtschaftliche Risiko bei der Gewinnung zu minimieren.

Dies ist wichtig für polymetallische Erze, die durch komplexe und vielfältige mineralische Gefüge und Verwachsungen charakterisiert sind. Sie erfordern spezielle Aufbereitungsanlagen und -strategien, um technisch und wirtschaftlich gewinnbar zu sein. Die optimale Gestaltung eines kosteneffizienten Aufbereitungsprozesses hängt demnach stark von quantitativ mineralogischen Informationen ab, die im Zentrum einer prozessmineralogischen und geometallurgischen Bewertung von Rohstoffen stehen.

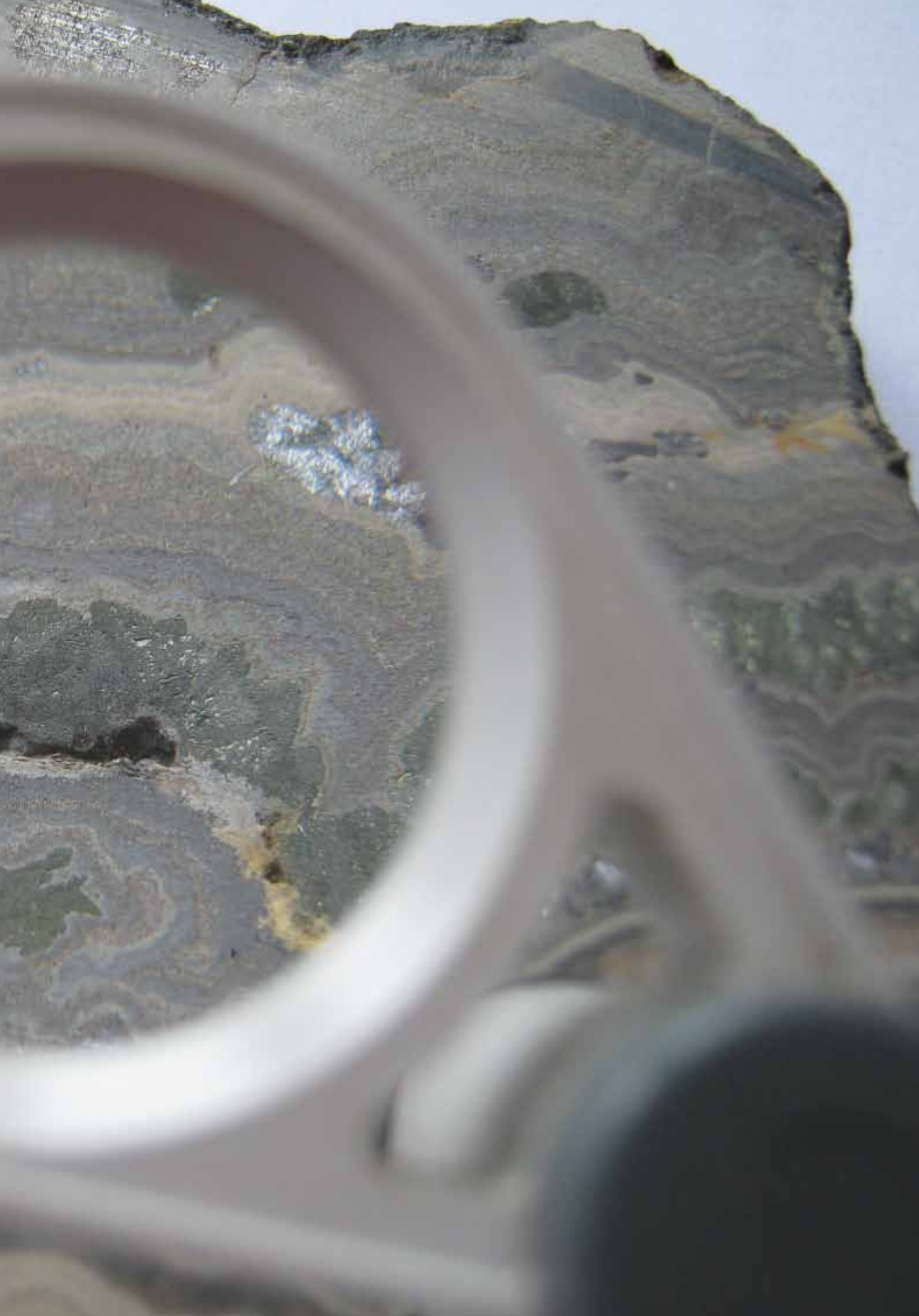
Die vorgestellte Forschungsrichtung wird derzeit in zwei Projekten des Förderprogramms „*r<sup>4</sup>*“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung angewendet. Sie eröffnet mit Blick auf Ressourceneffizienz hohe Potenziale für technologische Innovationen bei der Gewinnung und Aufbereitung komplexer Erze.

### Ressourcen im Siegerland

Im *r<sup>4</sup>*-Projekt „ReserVar – Ressourcenpotenzial hydrothermalen Lagerstätten der Varisziden“ – werden hydrothermale Kobalt-(Nickel)-Kupfer-Gold-Vererzungen im Siegerland untersucht. Durch die Erhebung quantitativ mineralogischer, geochemischer und strukturgeologischer Daten und ihrer Implementierung in geometrischen 3D-Lagerstättenmodellen wird ein Verständnis für die



Bild 2: Der erste Blick auf das Erz zeigt Bänder aus Zinkblende, Markasit und Bleiglanz. Die Minerale bilden die „Schalenblende“, die bis ins 20. Jahrhundert das wichtigste Erz im Aachener Raum und Grundlage für die metallverarbeitende Industrie war.



Verteilung und Anreicherung der technologisch bedeutenden Elemente Cobalt, Indium, Tellur, Antimon und Bismut erreicht. Dies ist eine entscheidende Voraussetzung für eine spätere geometallurgische Optimierung und umweltschonende wie ökologisch nachhaltige Nutzung heimischer Ressourcen. Die Forschung am Lehrstuhl für Angewandte Mineralogie und Lagerstättenlehre ist Teil eines nationalen Verbundforschungsprojekts mit Beteiligung der TU Clausthal, der Eberhard Karls Universität Tübingen, der TU Bergakademie Freiberg und des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf.

### Erkenntnisse in der Mongolei

Hochtechnologiemetalle wie Seltene Erden, Yttrium, Niob, Tantal lagern weltweit in Lagerstätten, die wirtschaftlich bisher kaum genutzt werden. Diese Lagerstätten sind an Alkali-Magmatit-Intrusionen gebunden. Im  $r^4$ -Verbundvorhaben „OptiWiM – Optimierung der Wertschöpfungskette für polymineralische Erze wirtschaftsstrategischer Metalle“ wird untersucht, ob mittels geometallurgischer Methoden Bergbauvorhaben möglich sind. Dies wird exemplarisch am Beispiel der Lagerstätte Khalzan Buregtei in der Mongolei geprüft. Komplexe, polymineralische Lagerstätten dieses Typs zeichnen sich durch drei Parameter aus: eine Vielfalt technologisch bedeutender Elemente niedriger Konzentration, komplexe Mineralogie und schwierige Bedingungen für eine Aufbereitung. Die Lagerstätten können daher ein breites Spektrum an Hochtechnologiemetallen liefern und sind somit relativ unempfindlich gegenüber marktbedingten Preisschwankungen einzelner Metalle.

Die Ressourcen der Lagerstätte werden mittels Computermodellen evaluiert, eine geometallurgische Charakterisierung und Modellbildung vorgenommen, die Aufbereitung der Erze untersucht. Anschließend wird unter Berücksichtigung verschiedener Kostenmodelle die Wirtschaftlichkeit geprüft. Die entwickelten geometallurgischen Methoden und Modelle sollen als Bewertungsgrundlage zukünftiger Explorationsvorhaben polymineralischer Erze weltweit dienen. Hintergrund dieser Forschungsinitiativen ist die Sorge um die Verfügbarkeit von wirtschaftsstrategischen beziehungsweise kritischen Metallen. Das Risiko der sicheren Versorgung gerade mit Rohstoffen für die Zukunftstechnologien ist in den letzten Jahren in den Blickpunkt der Politik und der Öffentlichkeit gerückt. Metalle werden

als kritisch angesehen, wenn die Eigenproduktion für einen für die Industrie wichtigen mineralischen Rohstoff nicht ausreicht und sich daraus eine hohe Importabhängigkeit ergibt. Damit besteht auch die Gefahr, dass die Versorgungskette empfindlich gestört oder völlig unterbrochen wird.

Mit den speziellen Materialanforderungen der Nachhaltigkeitstechnologien wurde die Rohstoffbasis der Industrie am Anfang dieses Jahrhunderts gravierend verändert. Die erforderlichen funktionellen Eigenschaften werden nicht mehr nur von den traditionell verwendeten Rohstoffen Eisen, Aluminium und Buntmetalle erfüllt. Von der Entwicklung und Anwendung der Zukunftstechnologien und der Abkehr von fossilen Brennstoffen zur Energiegewinnung gehen demnach neue Impulse für die Rohstoffnachfrage aus. Wenn in Zukunft der Energiebedarf in Deutschland zunehmend aus Wind- und Solarenergie gedeckt wird, verringert sich zwar dadurch der Bedarf an fossilen Energieträger, der Verbrauch an metallischen Rohstoffen wird aber ansteigen, um Wind und Solaranlagen oder andere Energiesysteme herzustellen. Heute sind deshalb die Hochtechnologiemetalle wie Indium, Tellur, Bismut, Niob, Tantal, Seltene Erden im Fokus. Die Zahl der von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuften Rohstoffe liegt nunmehr bei 20 und umfasst Metalle wie die Platingruppenelemente und Seltene Erden, aber auch Nicht-Metalle wie zum Beispiel Graphit und Silizium.

Der Ansatz, der für Lagerstätten im Siegerland und der Mongolei aufgezeigt wird, lässt sich auch auf Lagerstätten anderer kritischer Metalle übertragen. Ziel ist die Aufklärung der Steuerungs- beziehungsweise Rückkopplungsmechanismen zwischen lagerstättenbildenden Parametern, der Verbreitung und den prozessrelevanten Eigenschaften mineralischer Rohstoffe kritischer Metalle. Es werden Materialeigenschaften der Rohstoffe sowie deren Wechselwirkungen mit Gewinnungsprozessen und der Umwelt erfasst. So dient die Geometallurgie einer Erhöhung der Ressourceneffizienz, sie unterstützt umweltschonende Gewinnungsprozesse und verbessert die Wirtschaftlichkeit in der Nutzung von Lagerstätten wirtschaftskritischer Metalle.

---

### Autoren

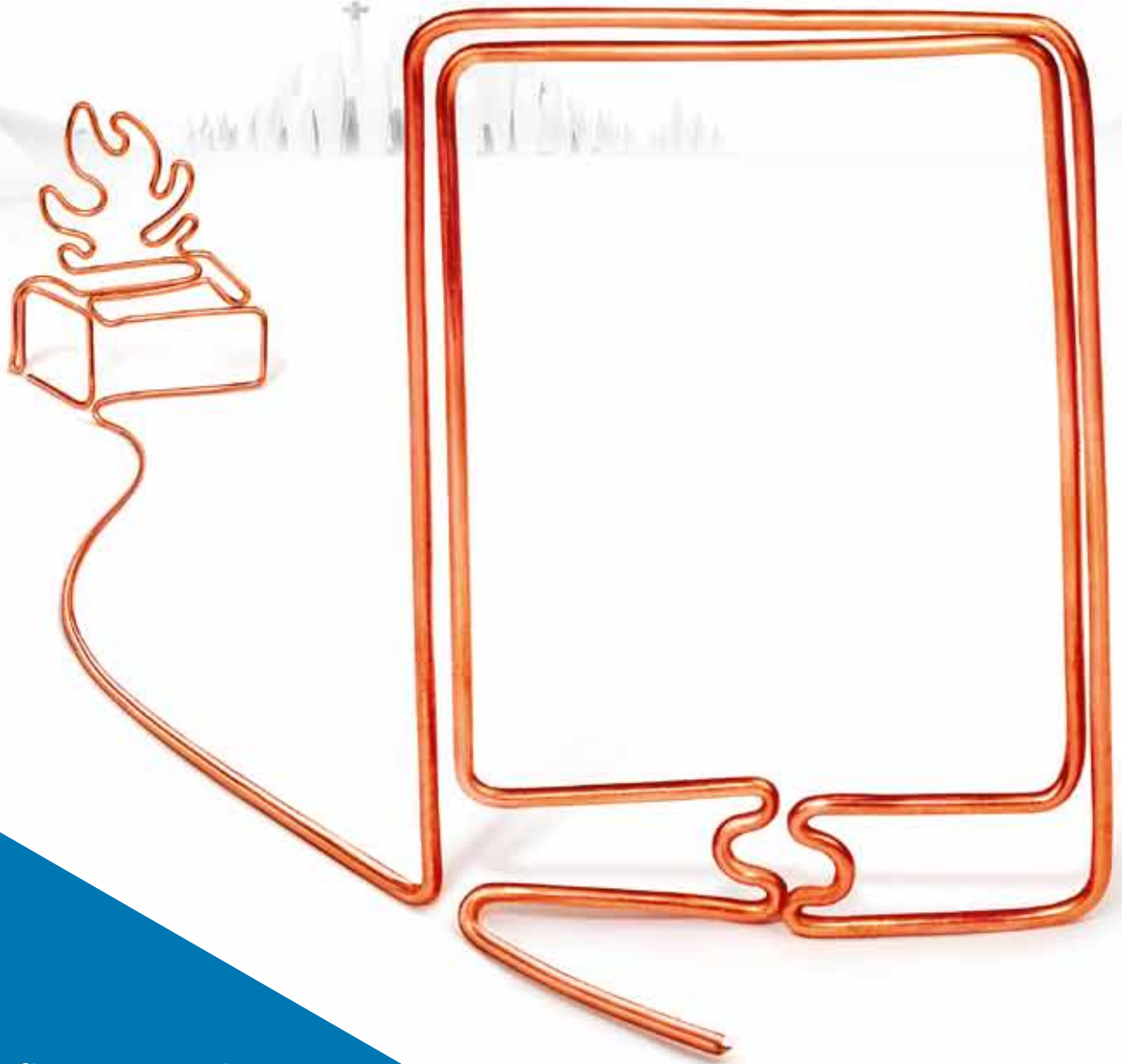
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Michael Meyer war Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Mineralogie und Lagerstättenlehre.

Dr. André Hellmann, Lars Gronen, M. Sc., und Markus Schramm, M. Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeiter und

Dr.rer.nat. Sven Sindern ist Privatdozent am Lehrstuhl für Angewandte Mineralogie und Lagerstättenlehre.

---

# So wird aus Ihrem Toaster ein Tablet.



## Aurubis, die Nummer eins im Kupferrecycling.

Vom Toaster bis zum Tablet: In jedem elektrischen Gerät steckt Kupfer. Wir recyceln Kupfer, aber auch die anderen Metalle ohne Qualitätsverlust, damit sie zu neuen Produkten weiterverarbeitet werden können. Als Multi-Metal-Recycler leisten wir einen entscheidenden Beitrag zum Umweltschutz und sichern langfristig die Versorgung mit wertvollen Ressourcen.

Mehr über unser Recycling erfahren Sie auf  
[www.aurubis.com/recycling](http://www.aurubis.com/recycling)

Bild 1: Schneidversuchsstand im RockCutting-Center des Instituts für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie.  
Foto: Peter Winandy

Thomas Bartnitzki

# Wir gewinnen Kohle – hören Sie es?

## Wie Sensorik den Bergbau revolutioniert

Automated and selective mining are the major aims for the efficient and safe supply of mineral resources in the future. Sensors can contribute to exploiting mineral deposits more efficiently and, consequently, in a more sustainable way. As an example, the mining industry is anxious to decrease the amount of worthless host rock while increasing the amount of valuable material. The Institute of Mineral Resources Machine Technology (IMR) has vast experience in adapting existing sensor technologies into harsh environments such as the mining industry. One technology increasingly brought into focus is Acoustic Emission (AE) technology. On the laboratory scale AE can be applied to distinguish hard coal and waste rock from each other. The next step now is to enable AE into a real environment and prove these results on a shearer loader.

Das „Knacken“ eines Eiswürfels in einem Whisky-Glas ist nicht bei jedem Eis gleich. Der Whisky-Fachmann kann vielmehr mit seinem geschulten Ohr ein uraltes Gletschereis von einem Eis aus dem Tiefkühlfach unterscheiden. Warum? Die eingeschlossene Luft im Gletschereis ist über tausende von Jahren unter Druck komprimiert worden. Durch die plötzliche Wärme des Whiskys kommt es zu Spannungsrissen im Eis: Das berühmte Knacken oder Knistern des Gletschereises. Einen ähnlichen Ansatz macht sich das Institut für Maschinentechnik in der Rohstoffindustrie zu Nutze, um den Rohstoff Kohle vom wertlosen Nebengestein zu unterscheiden. Die Automatisierung im Bergbau ist eines der drängenden Ziele für eine effiziente und sichere Versorgung mit mineralischen Rohstoffen in der Zukunft. Durch eine geeignete Sensorik kann eine Lagerstätte effizienter

und nachhaltiger gewonnen werden. Tausend Meter unter der Erde arbeiten heute riesige Gewinnungsmaschinen, die täglich bis zu 20.000 Tonnen Kohle für die Energieversorgung produzieren. Ein tonnenschwerer Koloss mit zwei Schneidarmen frisst sich dabei durch das Gestein und gewinnt wertvolle Kohle und – leider auch immer wieder – wertloses Nebengestein. In Deutschland wird noch immer der größte Teil der elektrischen Energie aus Kohle gewonnen. Über 40 Prozent des in Deutschland erzeugten Stroms kamen 2015 aus Kohlekraftwerken. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung wird zwar immer größer. Doch solange erneuerbare Energien den Energiehunger der Industrienationen nicht decken können, brauchen wir immer noch die Primärenergierohstoffe Kohle, Öl und Gas. Die vermeintlich saubere Alternative





des Atomstroms findet – aufgrund der Sicherheitsrisiken und Umweltbedenken – immer weniger Akzeptanz. Damit die Kohleförderung rentabel bleibt, ist die Industrie bestrebt, wertloses Nebengestein gar nicht erst zu gewinnen und so eine kostenintensive Trennung vom Wertstoff und die übertägige Lagerung des Abraums zu vermeiden.

Zurück zum Gletschereis: Ziel der Forschungsgruppe RockCutting war es, eine Sensorik zu entwickeln, mit der es möglich wird, eine autonom arbeitende Gewinnungsmaschine entscheiden zu lassen, welches Material sie gewinnen möchte und welches nicht. Dazu braucht die Maschine „Sinne“, die ihr Eindrücke der Umgebung vermitteln. Warum nicht eine Kamera als Augen verwenden? Versuche führten aber zu keinem Erfolg: Unter Tage ist es dunkel, staubig und die Kohle unterscheidet sich vom wertlosen Nebenge-

stein kaum in der Farbe. Es galt ein anderes Verfahren zu finden, das nicht auf optischen Eigenschaften beruht.

Dann halt „Hören“! Nicht nur der Whisky-Fachmann hat geschulte Ohren, auch der erfahrene Bergmann unter Tage. Er hört, wenn die Maschine schwerer arbeiten muss, weil sie gerade härteres Nebengestein anstatt der wertvollen Kohle schneidet. Dann korrigiert er die Position des tonnenschweren Maschinenarms mit der Schneidwalze, bis er wieder Kohle gewinnt. Erste Überlegungen waren die Geräusch-Emissionen und die Vibrationen der Maschine aufzunehmen und zu analysieren. Doch leider mit mäßigem Erfolg. Fuhr die Maschine nämlich schneller, so wurde sie auch lauter, obwohl sie Kohle und nicht Nebengestein schnitt. Dann kam der Gedanke: Kann man nicht auch die Kohle „knistern“ hören, wenn diese geschnitten wird, ähn-

lich wie beim Gletschereis? So entstand die Idee, die Acoustic Emission Technologie für die Materialerkennung im Schneidprozess einzusetzen.

Die Acoustic Emission Analyse ist ein Forschungsgebiet mit großem Potenzial, welches immer stärker Anwendung in der Maschinen-diagnose und verschiedenen Prüfverfahren findet. Das Phänomen wurde zu Beginn des letzten Jahrhunderts bei werkstofftechnischen Versuchen festgestellt. Bei plastischer Verformung unterschiedlicher Materialien können hochfrequente Schwingungsimpulse gemessen werden. Im Laufe der Jahre hat sich die Acoustic Emission Technologie von einer Nischentechnologie zu einer weltweit anerkannten Analyse-methode im Bereich der zerstörungsfreien Prüfungsmethoden entwickelt. Der Mensch kann nur Schall in einem Frequenzbereich von 16 Hertz bis 20 Kilohertz



Bild 2: Messrack zur Datenaufnahme und Auswertung von Acoustic Emission-Signalen.  
Foto: Peter Winandy



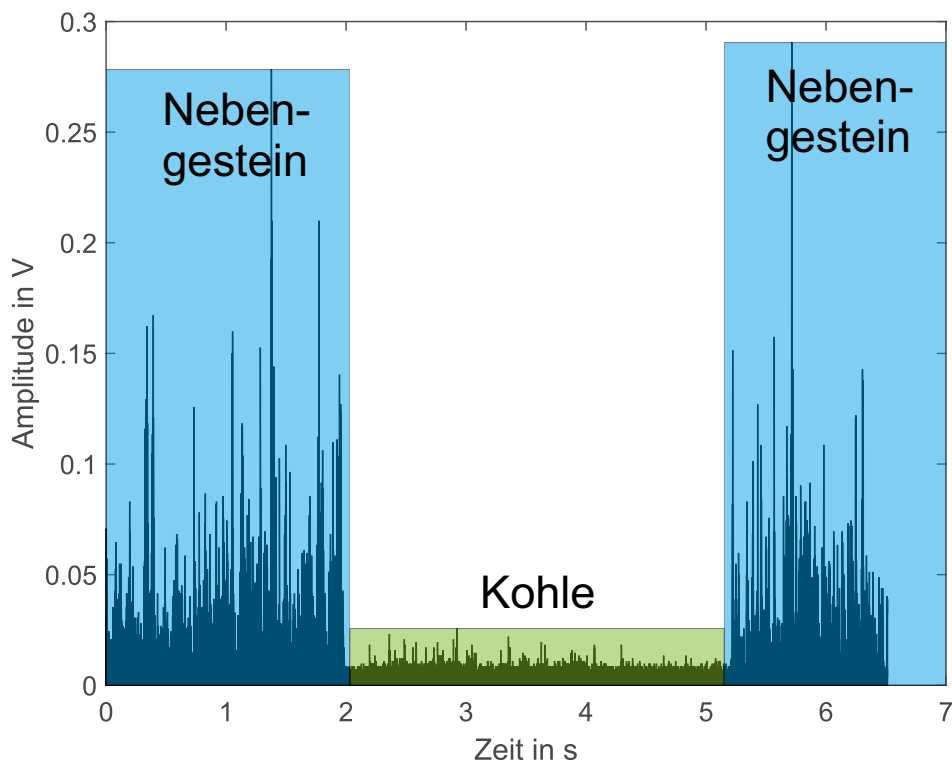


Bild 3: Aufgenommenes Acoustic Emission-Signal beim Schneiden von Nebengestein, dann Kohle und anschließend wieder Nebengestein.

wahrnehmen. Die Acoustic Emission Technologie analysiert Schallemissionen in einem Frequenzbereich von über 50 Kilohertz. Überall dort, wo Körperschall an seine Anwendungsgrenzen stößt, bietet die Acoustic Emission Technologie neue Möglichkeiten. So kann man mit dieser Methode auf die mineralogische Spaltbarkeit schließen, ein wichtiges Merkmal, um unterschiedliche Gesteine zu charakterisieren.

Internationale Veröffentlichungen aus der Vergangenheit haben gezeigt, dass Acoustic Emission-Signale zur Unterscheidung von Kohle und Nebengestein herangezogen werden können. Die Untersuchungen beschränkten sich jedoch bisher auf Frequenzen unter 100 Kilohertz. Im Rahmen von Untersuchungen am Institut für Maschinentechnik in der Rohstoffindustrie wurde gezeigt, dass beim Schneidprozess auch Frequenzen von über 100 Kilohertz auftreten und von hoher Relevanz für die Materialunterscheidung sind. Um die Eignung der Acoustic Emission Technologie für die Erkennung und Unterscheidung von Kohle und Nebengestein zu untersuchen, wurde das RockCutting-Center modernisiert und mit neuester Messtechnik ausgestattet.

Bei der Acoustic Emission-Messung fallen aufgrund der hohen Abtast-Rate von einem Mega-Hertz-Bereich Datenmengen von rund 40 Mega-Byte je Sekunde an. Dies entspricht etwa zehn Mal der Bibel im Volltext oder 8.000 Schreibmaschinenseiten. Diese Daten müssen in Echtzeit analysiert werden, um eine Aussage über das aktuell geschnittene Mineral zu erhalten.

Die durchgeführten Versuchsreihen zeigen, dass es dennoch sehr gut möglich ist, während des Gewinnungsprozesses aufgrund der Signale den Rohstoff Kohle von Nebengestein zu unterscheiden. Damit bekommt die Gewinnungsmaschine „die Ohren“, die sie braucht, um autark entscheiden zu können, welches Material sie hereingewinnt und welches nicht.

Sind diese Ohren heute schon an der Maschine verfügbar? Leider nein. Es bedarf noch einiger Anstrengungen, um die Erkenntnisse aus dem Labor in die Praxis zu übertragen. Ein Problem ist, die Sensorik so nah wie möglich an die Schneidorgane der Gewinnungsmaschine heran zu bringen. Ein anderes Problem ist, einen hoch performanten Auswerte-Algorithmus zu entwickeln, der in Echtzeit der Maschine signalisiert: „Du schneidest

gerade Nebengestein.“ Es bleibt festzuhalten, dass die Automatisierung im Bergbau eine zentrale Rolle für die zukünftige sichere und nachhaltige Rohstoffversorgung darstellt. Dies gilt nicht nur für Primärenergierohstoffe wie die Kohle, sondern auch für die Versorgung mit kritischen Metallen für die moderne Informationsgesellschaft. Die Sensorik ist dabei die Basis, die es überhaupt erst ermöglicht, über zukünftige Automation im Bergbau nachzudenken. Eine technische Revolution, die bereits begonnen hat.

### Autor

Dr.-Ing. Thomas Bartnitzki ist Forschungsleiter RockCutting am Institut für Maschinentechnik in der Rohstoffindustrie.



Bild 4: Applikation von Telemetrie-Sensorik  
am Schneidrad.  
Foto: Peter Winandy

# Aufbereitung seltenerdhaltiger Erze

## Anwendbarkeit der sensorgestützten Sortierung

The majority of rare earths mined are extracted from hard rock rare earth deposits. In order to mechanically separate rare earth minerals and to produce mineral concentrates of high grades, mechanical processing is necessary. Typically, the extracted ore is comminuted by highly energy consuming processes such as crushing and milling. Once the ore has reached liberation size, valuable minerals are separated from gangue minerals with sorting processes such as flotation in which, occasionally, harmful reagents are used and large masses of fine tailings produced. Sensor-based sorting (SBS), a technology used to sort particles at coarse particle sizes (ca.  $\geq 10\text{-}20\text{ mm}$ ), can help to reduce mass flows at an early stage of the processing chain. In a long-term perspective, this can lead to positive effects on the overall economic and environmental efficiency of processing operations such as reduced energy and reagent consumption. The article describes current research activities on sensor-based sorting of rare earth ores.

Der Großteil der weltweit abgebauten Seltenen Erden wird derzeit aus Hartgesteinslagerstätten gewonnen. Zur Sortierung der im Erz enthaltenen seltenerdhaltigen Minerale und zur Anreicherung der Wertminerale innerhalb von Konzentraten kommen aktuell ausschließlich konventionelle, mechanische Aufbereitungsverfahren zum Einsatz. Die abgebauten Erze werden hierbei zunächst durch energieintensive Zerkleinerungsprozesse wie der Mahlung bis zur Aufschlusskorngröße zerkleinert und im Erz enthaltenen Wertminerale anschließend durch Sortierprozesse wie der Flotation von den Gangmineralen getrennt und in mineralischen Konzentraten angereichert.

Eine sensorgestützte Sortierung seltenerdhaltiger Erze im groben Korngrößenbereich ( $\geq 10\text{-}20\text{ mm}$ ) findet bislang keine Anwendung. Dennoch bietet diese Technologie hohes Potenzial, längerfristig einen wertvollen Beitrag zur Effizienzsteigerung von Aufbereitungsprozessen auch für seltenerdhaltige Erze zu leisten. Beispielsweise könnte so ein wirtschaftlicher Abbau bislang ungenutzter, wertstoffarmer Lagerstätten ermöglicht und damit die potenzielle Rohstoffbasis zur Gewinnung Seltener Erden längerfristig vergrößert werden.

Die sensorgestützte Sortierung geht zurück auf die Handklaubung, eine der ältesten Sortiermethoden im Bereich der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe. Dabei werden wertstoffreiche und wertstoffarme Partikel händisch voneinander getrennt. Bei der sensorgestützten Sortierung ersetzen Sensoren das menschliche Auge und werden zur Erfassung unterschiedlicher Materialeigenschaften

genutzt. Die durch die Sensorik aufgezeichneten Messdaten werden mittels Algorithmen ausgewertet und die Partikel im Anschluss, durch gezieltes Aufbringen einer externen Kraft – in der Regel durch Druckluftstoß –, voneinander getrennt. Die Technologie stellt somit die automatisierte Form der Handklaubung dar. Bei neuartigen Sensorsortierern sind Ausblasraten von etwa 2.000 Partikeln pro Sekunde und Meter Arbeitsbreite möglich. Ein wichtiger Faktor für den erreichbaren Durchsatz von sensorgestützten Sortierern ist die Korngröße der sortierten Partikel. Im mineralischen Rohstoffbereich können durch Sensorsortierer unterschiedlicher Bauarten, Korngrößen von ein bis 300 Millimeter sortiert werden. Innerhalb weniger Millisekunden wird eine Vielzahl an Daten durch die Sensorik erfasst. Für die eigentliche Sortierung wird lediglich ein kleiner Teil der aufgezeichneten Datenmenge genutzt, während die übrigen Daten durch Algorithmen herausgefiltert werden. Dies ist wichtig, um hohe Durchsätze von mehreren 100 Tonnen pro Stunde und Meter Sortierbreite zu erzielen. Insbesondere werden sensorgestützte Sortierer für die Bergevorabscheidung verwendet, deren Ziel es ist, wertstoffarme beziehungsweise wertstofffreie grobe Partikel an einer frühen Stelle in der Prozesskette abzutrennen. Das durch die sensorgestützte Sortierung abgetrennte wertlose Gestein wird dann entweder als Versatzmaterial zum Schließen untertägiger Hohlräume genutzt oder deponiert. Werthaltiges Gestein wird in den nachfolgenden Prozessschritten weiterverarbeitet. Dadurch können Kosten für Folgeprozesse wie Feinmahlung und Feinsortierung reduziert

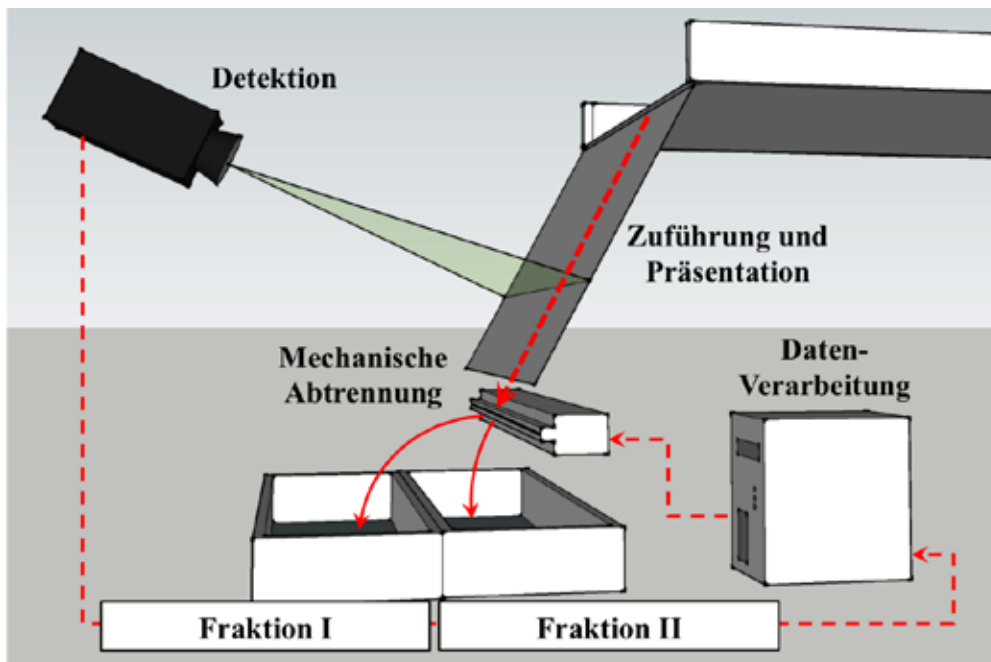


Bild 1: Schematische Darstellung eines Schurren-Typ Sensorsortierers.

werden. Weniger Energie und Wasser kommen zum Einsatz, Verschleiß und Reagenzien werden verringert. Zur Erfassung relevanter Materialkennwerte kommen verschiedene Sensortechnologien zum Einsatz. Unter anderem werden optische Farbsensoren, Nah-Infrarotsensoren, Metalldetektoren, röntgenbasierte Sensoren sowie radiometrische Sensoren verwendet. Welcher Sensortyp für welches Erz geeignet ist, muss in umfangreichen Testarbeiten festgestellt werden. Auch Kombinationen aus mehreren Sensoren, die in der Lage sind, eindeutig zwischen wertstoffhaltigen und wertstofflosen Partikeln zu unterscheiden, kommen in Frage.

Ein Forschungsschwerpunkt des Lehr- und Forschungsgebietes Aufbereitung mineralischer Rohstoffe besteht darin, potenzielle Einsatzgebiete für die sensorgestützte Sortierung und die Auswirkungen der Nutzung dieser Sortiertechnik für den primären Rohstoffbereich zu erforschen.

In diesem Zusammenhang wurden seltenerdhaltige Erze umfangreich getestet, um zu erfahren, ob die sensorgestützte Sortierung technisch anwendbar ist. Im Fokus stand hierbei die Identifizierung geeigneter Sensortypen für eine Differenzierung zwischen wertstoffhaltigen und wertstoffarmen Partikeln im groben Korngrößenbereich. Zum Einsatz kam beispielsweise der Multi-Sensor Prüfstand MIDAS zur Aufnahme von Partikelkenndaten. Projektabhängig werden neben Labor- und Technikumsversuchen auch Versuche im Pilotmaßstab, in enger Kooperation mit Industriepartnern, durchgeführt. Dies ermöglicht eine Validierung der im Labor- und Technikumsmaßstab erzielten Messergeb-

nisse durch state-of-the-art Industrie-Pilotanlagen. Am Beispiel seltenerdhaltiger Erze wurde unter anderem die Verwendbarkeit der Dual-Energy-Röntgentransmissionstechnologie – bekannt von den Gepäck-Sicherheitsscans am Flughafen – für die Klassifizierung wertstoffreicher und wertstoffarmer seltenerdhaltiger Partikel nachgewiesen. Bei diesem Sensortyp werden die zu sortierenden Partikel mittels Röntgenstrahlung durchstrahlt, die transmittierte Strahlung auf der gegenüberliegenden Seite des Materialstroms erfasst und für eine Charakterisierung der Partikel genutzt. Die Charakterisierung basiert bei diesem Sensortyp auf den röntgenspezifischen Absorptionseigenschaften zu sortierender Partikel. Die Wirtschaftlichkeit von Sortierprozessen bei der sensorgestützten Sortierung wurde mittels eigens entwickelter Simulationsmodelle berechnet. Hierbei konnten Einflussfaktoren untersucht werden, die eine wirtschaftliche Nutzung der sensorgestützten Sortierung am Beispiel seltenerdhaltiger Erze beeinflussen. Unter anderem werden Faktoren wie der Wertstoffgehalt im Erz, Energiekosten, Seltenerdpreise sowie das Wertstoffausbringen der sensorgestützten Sortierung berücksichtigt.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung neuer Kennwerte für eine optimierte Verwendung der bei der Sensorsortierung aufgezeichneten, aber bislang ungenutzten Messdaten. Potenziale bieten sich beispielsweise in der Erfassung prozessrelevanter Kenndaten wie der Wertmineralkorngröße. Hierzu wurden neue Kennwerte geprüft, anhand derer aufgezeichnete Röntgenbilder synthetischer, seltenerdhal-

tiger Probekörper charakterisiert werden und qualitative Rückschlüsse auf enthaltene Wertmineralkorngrößen möglich sind. Je genauer die Kenntnis über entsprechende Materialeigenschaften ist, desto besser können nachfolgende Prozessschritte wie die energieintensive Zerkleinerung gesteuert werden. Auch hier besteht daher die Möglichkeit, die Effizienz bislang genutzter Aufbereitungsverfahren nachhaltig zu steigern und den Energieverbrauch beispielsweise bei der Mahlung längerfristig zu reduzieren.

## Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotrubas betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe.

Kilian Neubert, M.Sc., war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe.

# Welchen Wert hat Restabfall?

## MARSS-Modul unterstützt Verwertung der biogenen Fraktion im Restabfall

Even if biogenic household waste is collected separately, it still accounts for the largest share of residual waste. Researchers from the Department of Processing and Recycling are investigating the properties and compositions of various waste materials, aiming to develop and test new, efficient waste treatment processes on an industrial scale. In the MARSS project (Material Advanced Recovery Sustainable Systems) a technical process was developed and proven, through which it is possible to produce a renewable biogenic fuel from preconditioned residual waste. Using the developed MARSS technology, greenhouse gas emissions will be reduced by substituting fossil fuel as well as by avoiding biodegradable substances from being landfilled.

Deutschland gehört zu den Spitzenreitern in Europa, wenn es darum geht, Haushaltsabfälle bereits am Entstehungsort zu sortieren und getrennt zu erfassen. Ausgehend von der Anzahl an Privathaushalten in Deutschland im Jahr 2014 kann man von etwa 40 Millionen einzelnen Entscheidern ausgehen, die jährlich über 37,6 Millionen Tonnen Abfälle sortieren. Neben der getrennten Erfassung von zum Beispiel Bioabfall, Glas, Verpackungen, Papier und Kartonagen steht den Haushalten auch die Restabfalltonne zur Verfügung. Hier werden Abfälle entsorgt, die keiner getrennten Erfassung zugeordnet werden können. Restabfall stellt mit ungefähr 35 Masseprozent – etwa 13,2 Millionen Tonnen – den größten Anteil der Haushaltsabfälle. Im Restabfall lassen sich wiederum zahlreiche Materialien finden, die eigentlich getrennt

erfasst werden könnten, beispielsweise Glas, Verpackungen und biogene Materialien. Letztgenannte – zum Beispiel Speisereste oder Gartenabfälle – machen den größten Anteil am Restabfall aus. In der Region Trier-Saarburg gibt es sowohl Gebiete, in denen biogene Abfälle getrennt gesammelt werden, als auch solche, die derzeit nicht an eine getrennte Sammlung über Biotonne angeschlossen sind. Gebiete mit einer Erfassung von Bioabfall enthalten im Mittel weniger Bioabfälle im Restabfall, sie machen jedoch immer noch mehr als die Hälfte der Restabfallmasse aus. Eine separate Erfassung verhindert demnach nicht, dass Bioabfälle im Restabfall landen.

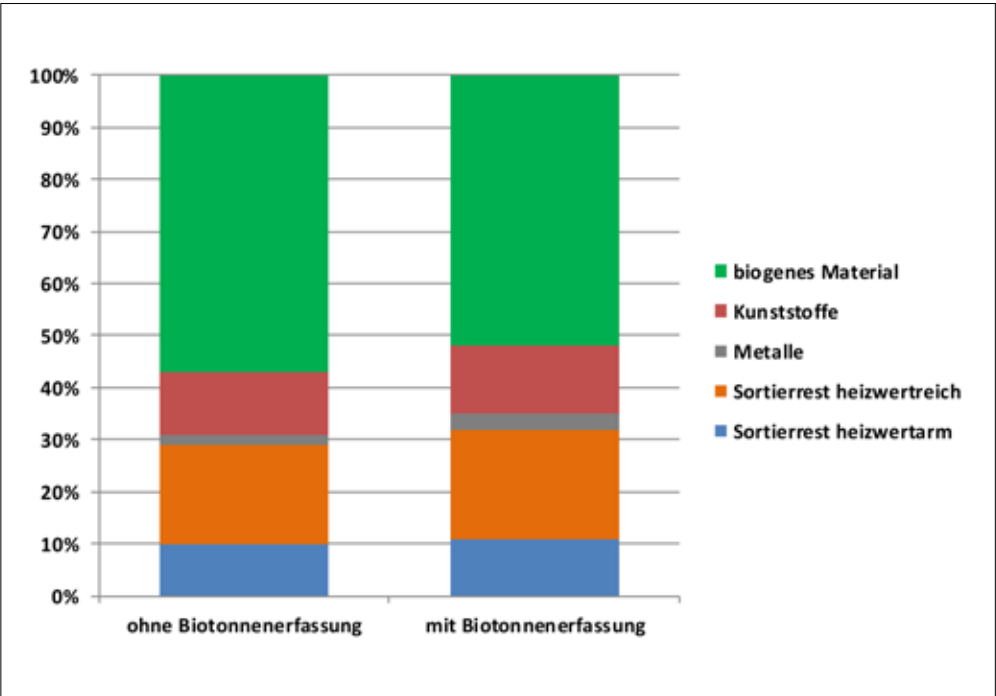


Bild 1: Mittlere Zusammensetzung von Restabfällen mit und ohne Anschluss an eine separate Biotonnenerfassung in der Region Trier-Saarburg.

**Restabfall samt Bioanteil beseitigt**

Während Abfall aus der Biotonne zu Dünger verwertet wird, ist bei der Restabfallbehandlung primär die Minderung und Immobilisierung von Schadstoffen und somit die Beseitigung des Abfalls Ziel. Die Behandlung von Restabfällen ist entweder durch Verbrennung und anschließende Aufbereitung der anfallenden Rostaschen oder durch eine mechanisch-biologische Abfallbehandlung zur Rückgewinnung der Wertstoffe und anschließender Deponierung der Reste möglich. Bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung werden die biogenen Materialien in anaeroben, also unter Sauerstoffabschluss, oder aeroben – Sauerstoff verbrauchenden – Prozessen behandelt. Ziel ist es, die biologische Aktivität der Materialien durch biologischen Abbau und Trocknung soweit zu

reduzieren, dass sie stabilisiert sind. So wird der Ausstoß an klimaschädlichen Deponiegasen – größtenteils Methan –, die bei der Deponierung des biogenen Materials durch anaerobe Mikroorganismen gebildet werden, deutlich reduziert. Der Deponierung von Haushaltsabfällen kommt in der Mehrzahl der europäischen Staaten – anders als in der Bundesrepublik Deutschland – nach wie vor eine hohe Bedeutung zu. Bei der thermischen Beseitigung wird der Abfall in großtechnischen Müllverbrennungsanlagen verbrannt und mineralisiert. Die Abfallbeseitigung steht jedoch hinter der stofflichen- und energetischen Verwertung an letzter Stelle der Abfallhierarchie, die im Kreislaufwirtschaftsgesetz formuliert ist. Zudem trifft die Abfallverbrennung in vielen Ländern auf erhebliche Akzeptanzvorbehalte.

Bild 2: Entsorgung von vorbehandeltem Restabfall in Europa.  
Quelle: Frei nach Eurostat 2014:  
<http://ec.europa.eu/eurostat/documents>

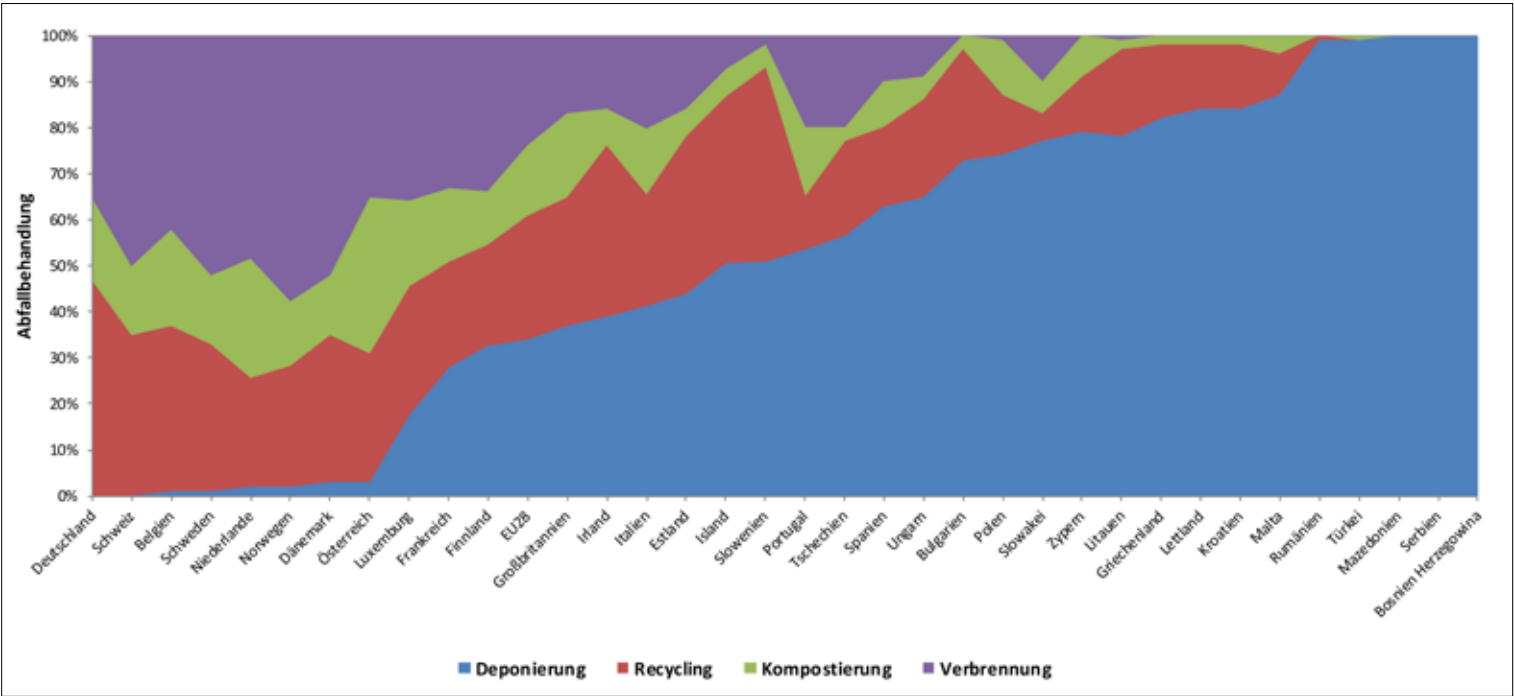






Bild 3: Mithilfe der MARSS-Technologie ist es gelungen, maßgeschneiderte Biomasse-Brennstoffe aus Restabfall zu erzeugen.

Foto: Peter Winandy



Bild 4: Brennstoffanalytik am Muffelofen: Bestimmung von flüchtigen Bestandteilen im Brennstoff.  
Foto: Peter Winandy

### Dünger oder Brennstoff?

Eine stoffliche Verwertung, also die Aufbereitung biogener Bestandteile des Restabfalls zu Dünger, ist aus qualitativen Gründen nicht möglich. Dies ergibt sich sowohl aus der Zusammensetzung von Restabfall als Senke im System, als auch den beschränkten technischen Reinigungsmöglichkeiten.

Als Alternative wird europaweit Restabfall in circa 400 mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen für eine Ablagerung auf Deponien konditioniert. Auf diese Weise lassen sich die Mindestanforderungen der EU-Deponierichtlinie erfüllen. In dem EU-Life+ Demonstrationsprojekt Material Advanced Recovery Sustainable Systems, kurz MARSS, untersuchte der Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling mit fünf Partnern aus Deutschland, Spanien und Italien die technisch-wirtschaftlichen Bedingungen, einen heizwertreichen, biogenen Brennstoff mit einem zusätzlichen technischen Modul – dem so genannten MARSS-Modul – aus einem biologisch vorkonditioniertem Abfall zu separieren. Mit dem MARSS-Modul soll die Masse an biogenem Material, die auf Deponien

endgelagert wird, deutlich reduziert werden. Besonders positive Umwelteffekte ergeben sich, weil fossile Brennstoffe wie Braunkohle durch den biogenen Brennstoff ersetzt werden können.

Zur Erprobung der MARSS-Technik wurde eine Demonstrationsanlage mit einem Durchsatz von etwa zehn Tonnen pro Stunde an eine bestehende mechanisch-biologische Abfallbehandlung angeschlossen.

Die MARSS-Technik ist vor allem für EU-Mitgliedstaaten gedacht, die die thermische Beseitigung von Abfällen ablehnen und größtenteils auf MBA-Technologien setzen – also vorwiegend süd- und osteuropäische Mitgliedstaaten. Begründet wird die ablehnende Haltung einerseits mit ökonomischen Argumenten wie die Weiterführung der Deponierung nach einer kostengünstigen Vorbehandlung und andererseits mit ökologischen Argumenten etwa Ablehnung der Verbrennung fossiler, nicht erneuerbarer Materialien wie zum Beispiel Kunststoffen. Dagegen finden Technologien zur Nutzung regenerativer Energieressourcen wesentlich höhere Akzeptanz.

**Verknüpfung von Siebklassiertechnik und Windsichtertechnik**

Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung kann bei entsprechender Prozessführung als mechanisch-biologische Trocknung aus einem Restabfall mit rund 50 Prozent Wassergehalt ein Stabilat mit einem Wassergehalt von etwa 15 Prozent bereitstellen. Im MARSS-Projekt wurde ein typisches Stabilat in der Demonstrationsanlage weiter behandelt. Unter Ausnutzung der spezifischen Materialeigenschaften wurde der Brennstoff anhand verschiedener mechanisch-physikalischer Trennverfahren aus dem getrockneten

Restabfall angereichert. Das Konzept beruht auf einer Verknüpfung von Siebklassier- und Windsichtertechnik, die an die speziellen Materialanforderungen angepasst wird. Da biogene Materialien nach der biologischen Trocknung größtenteils kleiner und Kunststoffverbunde größer als 40 Millimeter sind, lässt sich das biogene Material durch eine einfache Siebung anreichern. Mittels Windsichtung lassen sich Steine, Glase ebenso wie Kunststofffolien abtrennen. Dadurch wird zum einen der Heizwert erhöht und der Aschegehalt des Brennstoffs reduziert, zum anderen der Anteil an fossilen, also nicht

Wassergehalt ein Stabilat mit einem Wassergehalt von etwa 15 Prozent bereitstellen. Im MARSS-Projekt wurde ein typisches Stabilat in der Demonstrationsanlage weiter behandelt. Unter Ausnutzung der spezifischen Materialeigenschaften wurde der Brennstoff anhand verschiedener mechanisch-physikalischer Trennverfahren aus dem getrockneten Restabfall angereichert. Das Konzept beruht auf einer Verknüpfung von Siebklassier- und Windsichtertechnik, die an die speziellen Materialanforderungen angepasst wird. Da biogene Materialien nach der biologischen Trocknung größtenteils kleiner und Kunst

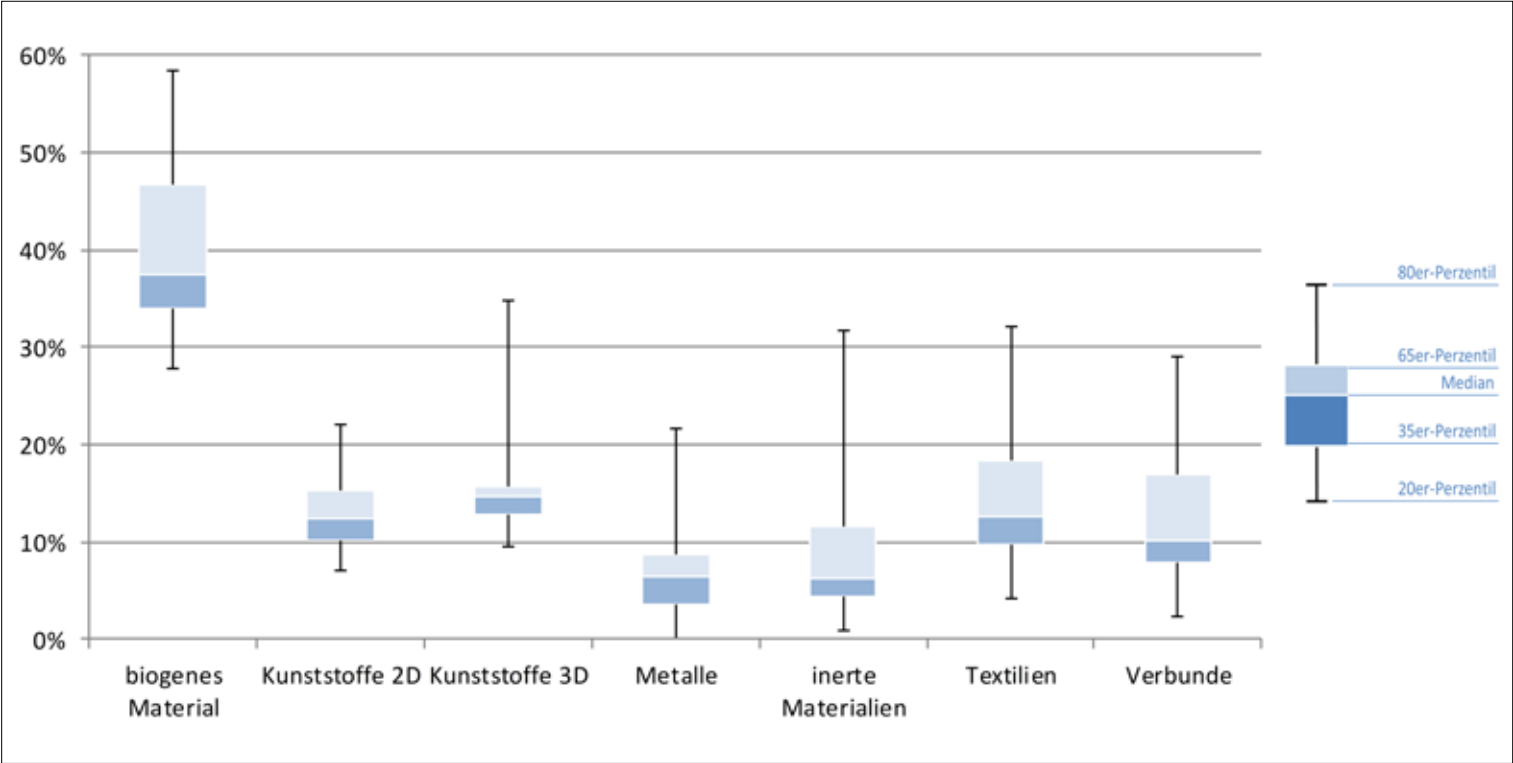


Bild 5: Schwankungen der Input-Restabfallzusammensetzung unter 40 Millimeter.



Bild 6: Entsorgungsingenieurin  
bei der Anlagenbeschickung.  
Foto: Peter Winandy

regenerativen Kunststoffen verkleinert. Bis zur Partikelgröße von etwa zwei Millimetern lässt sich eine effiziente Reinigung unter Verwendung von modifizierter Standardtechnologie durchführen. Die Mischung der gereinigten Anteile mit dem Siebfeinen unter zwei Millimeter ergibt einen regenerativen Brennstoff mit einem Heizwert von circa 11.000 Kilojoule pro Kilogramm, der in Wirbelschicht-Feuerungsanlagen energetisch verwertet werden kann. Die Verunreinigungen an fossilen Materialien liegen bei etwa sechs bis neun Prozent. Bezogen auf den getrockneten Output lassen sich über 40 Masseprozent der Abfälle zu Brennstoff verarbeiten. Mit Behandlungskosten von etwa 25 Euro pro Tonne ist das entwickelte MARSS-Modul vor allem für Länder mit hohen Deponiekosten ökonomisch interessant.

#### Erprobung im technischen Maßstab

Anhand des MARSS-Projekts lässt sich für das Forschungsgebiet der Aufbereitung und des Recyclings fester Abfallstoffe festhal-

ten, dass der Zugriff auf „echte“ Abfälle von essenzieller Bedeutung ist. Das macht ein Mitwirken von Akteuren aus der Entsorgungswirtschaft an Forschungsprojekten unerlässlich. Die Erforschung neuer, effizienter Aufbereitungstechniken erfordert die Kenntnis über das Inputmaterial. Da jedoch gerade Abfälle und besonders Restabfälle variable, heterogene Materialgemische sind, lassen sich keine allgemeingültigen Zusammensetzungen und Aufbereitungsprozesse definieren. Je nach Einzugsgebiet und Bevölkerungsstruktur oder der jahreszeitlichen Abfuhrzeit kann es zu starken Schwankungen in der Abfallzusammensetzung kommen. Diese Variabilität des Abfalls verbietet die Erprobung von Aufbereitungsverfahren in einem Labormaßstab und verlangt nach Projekten im technischen Maßstab, wie im MARSS-Projekt erfolgt. Die Daten und Ergebnisse der Projekte sind für ein tieferes Prozessverständnis unerlässlich. Sie liefern die Grundlage für prozesstechnische, ökonomische oder ökologische Bewertungen

ebenso wie für eine wirklichkeitsnahe Modellierung von Prozessen. Da reale Prozesse stets einen Kompromiss zwischen Effizienz und Alltagstauglichkeit darstellen, ist in Verbindung mit vertiefter Kenntnis von Abfalleigenschaften schließlich der Entwurf angepasster technischer Konzepte möglich. Letztlich fließen die Erkenntnisse in den Entscheidungsprozess ein, der für langlebige Infrastrukturprojekte der Abfallbehandlung die lokalen Bedingungen berücksichtigen muss.

---

#### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz ist Inhaber des Lehrstuhls für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe.

Dr.-Ing. Adele Clausen, Holger Giani, M.Sc., und Dr.-Ing. Karoline Raulf sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe.

---



## CU @ Wieland: Kupfer verbindet

Smartphone, Auto, Notebook. Kupfer ist überall. Und deshalb sind auch wir überall. Wir, das sind 6.800 Kollegen der Wieland-Gruppe an mehr als 40 Standorten weltweit. Seit über 190 Jahren gestalten wir die Zukunft mit Kupfer und Kupferlegierungen. Dabei verbinden wir nicht nur Technik mit Wissen und Erfahrung, sondern bauen auch auf das Engagement und die

Fähigkeiten unserer Mitarbeiter. Doch wie sieht es mit Ihrer Zukunft aus? Wir suchen neue Talente, die bei uns anpacken und dabei ihr Know-how einbringen. Werden Sie Teil dieser Erfolgsgeschichte und entwickeln Sie mit uns neue Ideen. **See you @ Wieland!** Gestalten Sie Ihre und unsere Zukunft.

[www.wieland-karriere.de](http://www.wieland-karriere.de)



[facebook.com/WielandKarriere](https://facebook.com/WielandKarriere)

**Wieland**

# Thermisch-pyrolytische Aufbereitung von Metallkonzentraten

## Aufschluss von Verbundstoffen zur Wiedergewinnung von Metallen

Metal concentrates obtained by the mechanical processing of waste streams often show high amounts of metal-impurity compounds. Sole mechanical processing of metal concentrates with the aim of producing high quality metal products has proven to be challenging in the past. Therefore, a combination of thermal-pyrolytic and mechanical processing has been developed. With this method, shredder light fractions, electronic waste and metal concentrates from landfill reclamation have been examined. Within the scope of the experiments, suitable process parameters have been identified and the treatment results evaluated. For all examined fractions, a high compound separation was achieved. It was possible to reclaim the contained metals largely free of impurities. Overall, it was possible to prove the general suitability of thermo-mechanical processing of metal-rich compounds with the aim of reclaiming the contained metals.

Stoffströme, die nennenswerte Anteile von Metall-Störstoff-Verbunden enthalten, stellen zum Teil hohe Anforderungen an die Aufbereitung. Eine effektive mechanische Aufbereitung derartiger Materialien hat sich in der Vergangenheit als schwierig erwiesen, da zur Auftrennung der Metall-Störstoff-Verbunde eine erhebliche Reduzierung der Korngröße vorgenommen werden muss <sup>[1]</sup>. Insbesondere beim Recycling von Nichteisenmetallen, wie beispielsweise Aluminium, ist eine weitgehende Abtrennung von organischen Störstoffen notwendig. Erfolgt diese nicht, treten vergleichsweise hohe Umschmelzverluste auf <sup>[2, 3]</sup>.

Beispiele für metallreiche Verbundfraktionen sind unter anderem Schredderleichtgut, Elektroschrott sowie Metallverbundfraktionen aus Sortieranlagen. Aufgrund der problematischen Materialeigenschaften erfolgt derzeit keine vollständige Nutzung der im Schredderleichtgut enthaltenen Metalle <sup>[1, 4]</sup>. Durch die im Jahr 2000 eingeführte Europäische Altfahrzeugrichtlinie wird ab dem Jahr 2015 aber eine Erhöhung der Verwertungsquote auf 95 Prozent sowie der stofflichen Verwertungsquote auf 85 Prozent gefordert <sup>[1, 4]</sup>. Die manuelle und mechanische Aufbereitung von Elektroaltgeräten ist ebenfalls mit einem hohen personellen und technischen Aufwand verbunden <sup>[5]</sup>. Zudem sind technisch bedingt hohe Material- und Wertstoffverluste zu verzeichnen <sup>[6, 7]</sup>. Vor diesem Hintergrund wird

nach großtechnisch umsetzbaren Verfahren zur optimierten Aufbereitung von metallreichen Verbundstoffen gesucht. Zur Lösung dieses Problems werden am Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe Untersuchungen zur thermisch-pyrolytischen Aufbereitung von Metallkonzentraten aus Abfällen durchgeführt. Neben den Fraktionen Schredderleichtgut und Elektroschrott stehen im Rahmen des r<sup>3</sup>-Verbundvorhabens „Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfall- und Schlackedepoien“ Metallkonzentrate aus Depoien im Fokus <sup>[8]</sup>. Um eine Übertragung der Forschungsergebnisse auf großtechnische Prozesse zu ermöglichen, wurde in den bisherigen Untersuchungen ein kontinuierlicher Behandlungsprozess unter Verwendung eines Drehrohrreaktors untersucht.

### V-Faktor als Maß der Effektivität

Die Zielsetzung der Versuche liegt in der Evaluierung der Möglichkeiten zur Aufbereitung von Metallverbundfraktionen. Dabei steht insbesondere im Vordergrund, wie stark Verbundstoffe aufgetrennt werden können. Darüber hinaus werden die bei der Behandlung anfallenden Prozessprodukte Koks, Kondensat und Pyrolysegas untersucht. Zunächst wurden die in den abfalltypischen Laborproben enthaltenen Materialien durch eine Sortieranalyse überschlägig ermittelt.



Bild 1: In einem Drehrohrföfen werden unter Luftabschluss komplexe Metallverbunde thermisch aufgeschlossen.  
Foto: Peter Winandy

Sie wurden händisch in vordefinierte Stoffgruppen eingeteilt, deren Gewichtsanteile erfasst und alle frei vorliegenden Wertstoffe sowie Wertstoffverbunde quantifiziert. Als Wertstoffe werden in diesem Zusammenhang Eisen- und Nicht-Eisenmetalle bezeichnet. Als Maß für den Erfolg der Behandlung dient das Verhältnis frei vorliegender Metalle zu Metallverbunden [g/g] (V-Faktor) in den jeweiligen Fraktionen. Diese ergeben sich aus dem Quotienten der Gesamtmasse der in einer Fraktion frei vorliegenden Wertstoffe und der Gesamtmasse der in der Fraktion befindlichen Verbunde (Gl. 1) [9].

$$V = \frac{m_{fM}}{m_{MV}}$$

V = Verhältnis frei vorliegender Metalle zu Metallverbunden

m<sub>fM</sub> = Masse frei vorliegender Metalle

m<sub>MV</sub> = Masse Metallverbunde

Der für das Ausgangsmaterial ermittelte V-Faktor wurde jeweils mit den Analyse-Ergebnissen nach der thermisch-mechanischen Behandlung des Materials verglichen. Er ist die Basis für die Bewertung der Effektivität der Behandlung [9].

Für die thermisch-pyrolytische Behandlung der Einsatzmaterialien wurde ein elektrisch beheizbarer Drehrohrföfen im Technikums-Maßstab mit einem Durchsatz circa ein bis

zwei Kilogramm pro Stunde genutzt. Durch die kontinuierliche Rotation des Rohres wird das aufgegebene Material in Längsrichtung transportiert und dabei stetig umgeschichtet. Die Neigung des Reaktors, die die Transportgeschwindigkeit bestimmt, ist variabel verstellbar. Dem Drehrohrföfen nachgeschaltet ist eine Gasreinigungsstrecke. Dort werden kondensierbare Bestandteile abgeschieden und Gasproben entnommen. Im Vorfeld der Pyrolyseversuche wurden zunächst für jede Fraktion die geeigneten Drehrohrreinigungen und -parameter in Kaltversuchen ermittelt. Mit den verschiedenen Fraktionen Deponat, Elektroschrott und Schredderleichtgut wurden schließlich Pyrolyseversuche im Temperaturbereich von 500 bis 700 Grad Celsius durchgeführt. Die eingestellten Verweilzeiten lagen je nach Fraktion zwischen 60 und 80 Minuten.

An den Metallen hafteten nach der thermischen Behandlung Koksreste an, die eine spröde Konsistenz aufwiesen. Zur Auftrennung dieser Koks-Metall-Verbunde wurde bei Behandlung des Schredderleichtguts und der Deponiefraktion eine mechanische Trennstufe nachgeschaltet, in der das Material kurz mittels Prallzerkleinerung beansprucht wurde.

**Metallkonzentrate von hoher Reinheit**

Am Beispiel der Metallkonzentrate aus rückgebautem Deponiematerial zeigt sich die erzielte Verbundstoffauftrennung: Die Kon-

zentrate, die bei der thermischen Behandlung zum Einsatz kamen, wurden in einer mechanischen Behandlungsanlage erzeugt. Die Sortieranalyse des Pyrolyseproduktes ergab, dass durch die pyrolytische Behandlung Metallkonzentrate mit hoher Reinheit generiert werden konnten. Im Ausgangsmaterial wurden V-Werte von 0,1 bis 1 festgestellt. Nach der Behandlung lagen die Werte, je nach Pyrolysetemperatur, zwischen 7,2 und 33,7. Es waren dementsprechend nur noch minimale Verbundanteile vorhanden [9]. Die verbliebenen Metallverbunde bestanden überwiegend aus Metallteilen, die mit Koksablagerungen verunreinigt waren. Durch Verwendung eines Kastensiebes konnten diese Metalle nahezu vollständig vom Koks separiert werden.

**Mehr Metall als Metallverbund**

Die Versuche haben gezeigt, dass durch eine pyrolytische Aufbereitung der Verbundfraktionen das Verhältnis frei vorliegender Metalle zu Metallverbunden signifikant gesteigert werden kann. Durch die thermische Verbundstoffauftrennung können die Metalle weitgehend freigelegt und anschließend durch einfache mechanische Beanspruchung nahezu sortenrein zurückgewonnen werden. Die Behandlungsmethode wird für die untersuchten Anwendungsfälle dementsprechend als grundsätzlich geeignet eingestuft. Durch den Einsatz dreier unterschiedlicher metallreicher



Bild 2: Metalle, beispielsweise aus Leiterplatten, können zu großen Anteilen zurückgewonnen werden.  
Foto: Peter Winandy



Bild 3: Ausgangsmaterial (links), Metallprodukt (mitte) und Koks (rechts) aus der Pyrolyse von Metallkonzentraten aus Deponiematerial bei 600 Grad Celsius <sup>[9]</sup>.

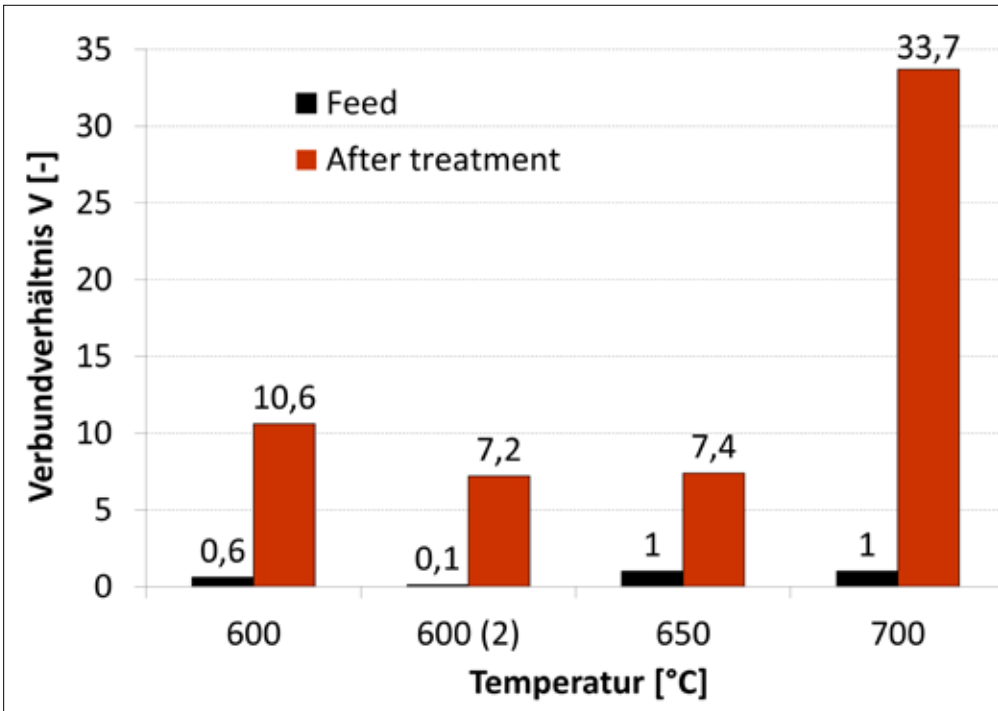


Bild 4: Verbundstoffverhältnisse V von Ausgangsmaterial (schwarz) und Produkten (rot) der Pyrolyseversuche mit Metallkonzentraten aus rückgebautem Deponiematerial <sup>[9]</sup>.

Fractionen konnte die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf unterschiedliche Ausgangsmaterialien nachgewiesen werden. Die im Prozess gebildeten Gase sind grundsätzlich brennbar und können in einer großtechnischen Anlage zur Prozessbeheizung genutzt werden.

Der Fokus der weiteren Forschung wird auf die Prozessprodukte Koks sowie die entstehenden Gase gelegt. Basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Koksanalyse erscheint eine energetische Verwertung des Kokes – in Anlagen mit entsprechender Emissionsminderungstechnik – grundsätzlich möglich. Zur Verifikation sind jedoch weitere Untersuchungen und Produktanalysen erforderlich. Die daraus hervorgehenden Erkenntnisse sollen eine energetische Bilanzierung des Gesamtprozesses erlauben. Auf dieser Basis ist ein Konzept für die großtechnische Umsetzung zu entwickeln und schließlich die wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Behandlungsmethode zu prüfen.

Literatur

[1] D. Goldmann, E. Gierth, Recycling und Rohstoffe – Band 1, 1st ed., Vol. 1, TK Verlag, Neuruppin 2013.  
 [2] B. Jaroni, B. Friedrich, G. Rombach, in Proc. of the 45. Metallurgical workshop, (Eds: U. Waschki), Expert Committee for Education and Training in Metallurgy, Ulm 2012.  
 [3] A. Giese, H. Rahms, D. Mackenstedt, Aluminium Intern 2007, 83 (10), 76-79.  
 [4] T. Reinhard, U. Richers, Entsorgung von Shredderrückständen – ein aktueller Überblick, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 2004.  
 [5] H. Martens, Recyclingtechnik, 1st Ed., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011.  
 [6] P. Chancerel, V. Rotter, Müll und Abfall. 2009, 2, 78 – 82.  
 [7] P. Chancerel, PhD. Thesis, Technische Universität Berlin 2010.  
 [8] r<sup>3</sup> - Strategische Metalle und Mineralien, Innovative Technologien für Ressourceneffizienz, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn 2013.  
 [9] M. Rotheut, T. Horst, P. Quicker, Thermo-mechanical treatment of metal composite fractions. Chemie Ingenieur Technik, Volume 87, Issue 11, 2015.

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe, Thomas Horst, M. Sc., ist Oberingenieur am Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe, Dipl.-Ing. Martin Rotheut war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe.

# Effizientes Recycling von Elektronikschrott

## Die Herausforderung, 20 Metalle zurückzugewinnen

More than 40 million tons – this is the quantity of electric and electronic waste that accumulates worldwide every year and increases further with an annual rate of 3 to 5 %. Sustainable solutions to manage these amounts are not in sight. The IME – the Institute of Process Metallurgy and Metal Recycling – engages in the challenge to find new opportunities for a holistic metal recovery from these recycling materials. Against this backdrop, both pyro- and hydrometallurgical processes are examined, developed and proved in order to review their potential and increase their efficiency. The whole concept is designed to provide several sub-processes, which can be arranged as a module kit, whereby the overall process can be adapted to the properties of the input material and the desired product.

Neuer, besser oder einfach anders: Von Jahr zu Jahr steigt die Nachfrage nach aktueller Technik, besonders bei Privatpersonen. So werden im Mobilfunksektor verbraucher-optimierte Verträge angeboten, die jährlich das neueste Modell garantieren und so die Produktzyklen weiter verkürzen. Der damit einhergehende Produktionsanstieg verursacht einerseits bedingt durch die hohe Nachfrage nach Metallen eine stetig wachsende globale Ausbeutung der Ressourcen, andererseits einen Berg an Elektronikschrott. Dabei könnte dieser eine attraktive, alternative Rohstoffquelle zu primären Metallressourcen darstellen, da er beträchtliche Mengen an Wertmetallen mit hohem ökonomischem Potenzial beinhaltet. So sind bis zu 60 verschiedene Werkstoffe in einem Handy zu finden, darunter mehr als 20 Metalle. Dies sind neben den bekannten Basismetallen wie Kupfer, Aluminium und Eisen sowie verschiedenen Edelmetallen je nach Sorte auch so genannte kritische Metalle. Die Eigenschaft „kritisch“ umschreibt weniger das geringe Vorkommen dieser Metalle in der Erdkruste, sondern viel mehr ein hohes Versorgungsrisiko kombiniert mit einer großen wirtschaftlichen Bedeutung. Sie sind häufig unverzichtbar für Technologieanwendungen. Auch Mobiltelefone beinhalten diese Metalle, speziell Indium, Gallium und Germanium. Doch trotz der großen Chance, die dieser Rohstoff bietet, gibt es noch kein umfassendes Recyclingverfahren, welches die Massen bewältigen kann und alle Metalle berücksichtigt, um das gesamte Potenzial des Rohstoffes auszuschöpfen.

Die Herausforderung bei der Entwicklung eines umfassenden Recyclingverfahrens stellt neben der hohen Komplexität des Schrottes seine große Heterogenität dar. Der Schrott variiert nicht nur in seiner Stückgröße, beginnend bei ganzen Bauteilen bis hin zu wertvollen Stäuben aus der Aufbereitung, sondern ebenfalls in seiner chemischen Zusammensetzung. Neben verschiedenen Metallen besteht der Schrott zu großen Teilen aus Kunststoffen und Keramiken. Wird der Schrott ohne Vorsortierung in Industrieöfen eingeschmolzen, führt der hohe Kunststoffanteil im Material oft zu erheblichen Problemen. Zum einen verbrennen die Kunststoffe unkontrolliert, wodurch große Wärmemengen frei werden, die sich prozesstechnisch nur schwierig kontrollieren lassen. Zum anderen sind Kunststoffen häufig Halogene wie Brom und Chlor als Flammenschutzmittel zugesetzt, die während des Einschmelzens gasförmig ausgetragen werden und das Abgasbehandlungssystem der Öfen stark beanspruchen.

Um Elektronikschrott ganzheitlich recyceln zu können, wird am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling ein Konzept entwickelt, welches aus mehreren Teilverfahren besteht, wobei jedes Teilverfahren eine andere Komponente des Rohstoffs berücksichtigt. So werden Lösungen für die Heterogenität des Schrottes, die Bewältigung des Energiegehalts, die Abtrennung von Schadstoffen sowie die effektive Gewinnung von Metallen entwickelt. Die Verfahren können nach dem Baukastenprinzip miteinander kombiniert werden, wodurch der Gesamtprozess

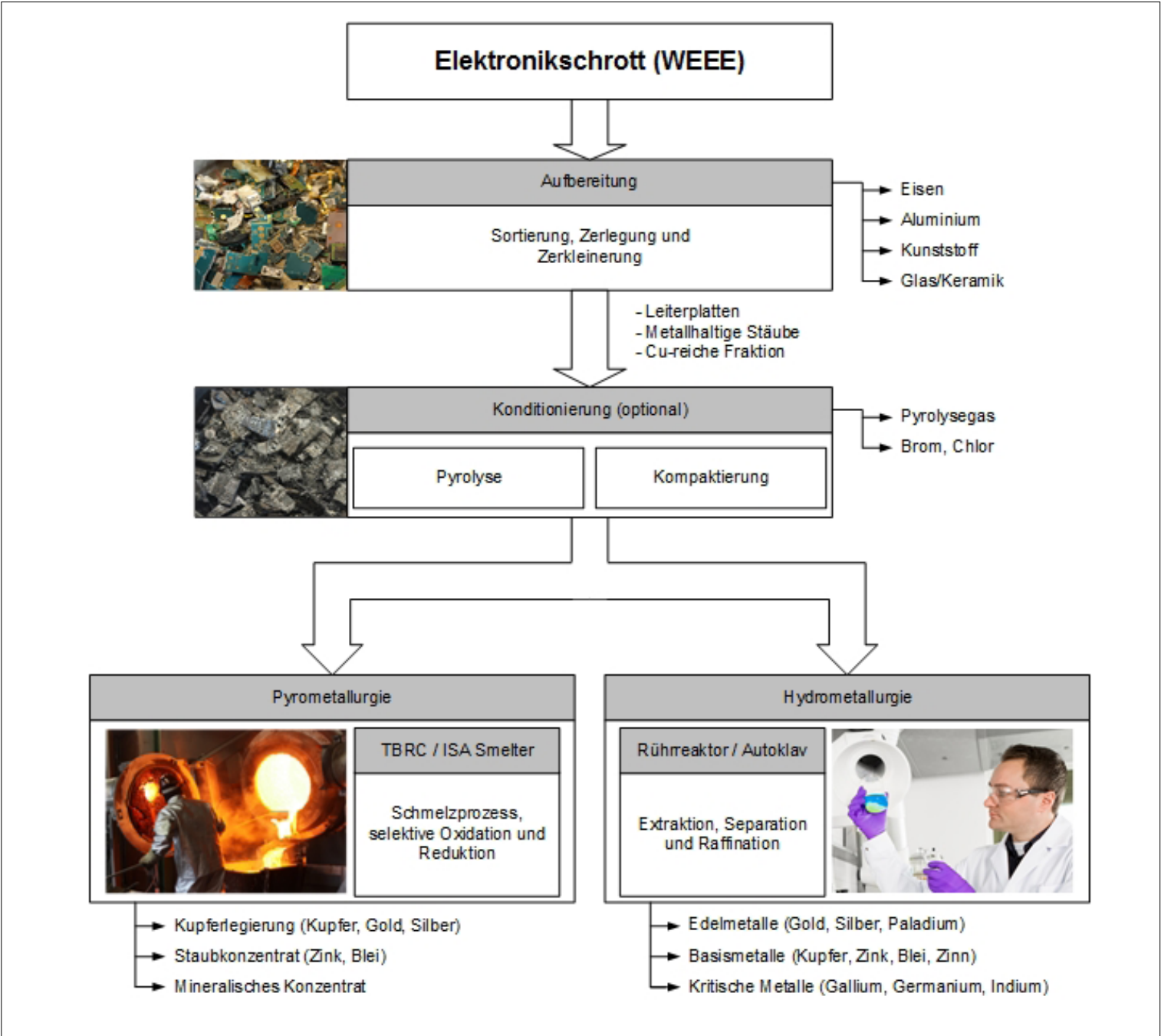


Bild 1: Übersicht der am Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie untersuchten Prozessschritte.

entsprechend der Beschaffenheit des Einsatzmaterials und der gewünschten Produkte adaptiv und flexibel gestaltet werden kann.

**Thermische Konditionierung**

Um die Schwierigkeiten, die sich während des direkten Einschmelzens von Elektronikschrott durch anhaftende Kunststoffe ergeben, zu beheben, kann Elektronikschrott vor dem Schmelzprozess einer thermischen Vorbehandlung, einer so genannten Pyrolyse, unterzogen werden. Pyrolyse beschreibt die thermische Zersetzung von langkettigen Kohlenwasserstoffen unter Sauerstoffab-

schluss mit dem Hauptziel, die Struktur des Kunststoffes aufzuspalten. Als Produkte der thermischen Konditionierung entstehen ein Pyrolysegas sowie ein kohlenstoffreicher Feststoff, Pyrolysekoks genannt. Der Pyrolysekoks enthält die nicht flüchtigen Bestandteile, wie Metalle, Glas und Keramik. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass durch die Pyrolyse Masseverluste von 15 bis 20 Prozent des Einsatzmaterials erzielt werden können, was zu einer Anreicherung von Wertmetallen führt. Gleichzeitig werden unerwünschte Halogene aus dem Kunststoff verflüchtigt und mit dem Gasprodukt entfernt. Die Pyrolyse des Kunst-

stoffes erleichtert daneben die Trennung der unterschiedlichen Metalle und elektronischen Bauteile von den Leiterplatten. Ferner kann das Pyrolysegas dazu genutzt werden, kritische Metalle wie Gallium, Germanium, Indium zurückzugewinnen, die nur in geringen Konzentrationen im Elektronikschrott vorliegen. Das angestrebte Ziel ist eine Reaktion zwischen dem Pyrolysegas und den kritischen Elementen. Die dabei entstehenden gasförmigen Metallverbindungen können mit dem Abgas aus dem Reaktor ausgetragen und durch eine gezielte Abgasbehandlung aus dem Abgasstrom auskondensiert werden.



Bild 2: Pyrometallurgische Verarbeitung von Elektronikschrott bei Temperaturen von bis zu 1400 Grad Celsius.

### Pyrometallurgie

Um aus dem Elektronikschrott die Basis- und Edelmetalle zurückzugewinnen, bieten sich pyrometallurgische Verfahren an, bei denen das Einsatzmaterial aufgeschmolzen wird. Am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling wird der Schmelzprozess in diesem Fall in einem Drehtrommel-Ofen realisiert. Dabei kann der Elektronikschrott direkt oder der aus der thermischen Konditionierung gewonnene Pyrolysekoks zur Anheizung des Schmelzprozesses eingesetzt werden. Die im Pyrolysekoks enthaltenen hohen Anteile an Kohlenstoff werden als Energieträger genutzt und durch Sauerstoffzugabe verbrannt. So kann der gesamte Schmelzprozess ohne zusätzliche Energiezufuhr betrieben werden. Als Produkte entstehen eine Schlacke, in der Glasfasern und Keramiken, sowie eine Metallphase, in der Basis- und Edelmetalle,

zurückgewonnen werden. Die Herausforderung dieses Verfahrens besteht zum einen in der Kontrolle des großen Energiegehalts, zum anderen in der starken Heterogenität der Schrotte. Ein eigens entwickelter Lösungsansatz nutzt ein neues Verfahren, bei dem zerkleinerte und individuell gemischte Schrotte unter eine Schaumphase eingeblasen werden. Ziel ist es, durch den Einsatz einer gezielten Mischung unterschiedlicher Schrotte den Energie- und Metallgehalt so weit zu homogenisieren, dass ein stabiler Schmelzprozess garantiert werden kann. Weitere Vorteile sind neben der Stabilisierung des Prozesses auch die Effektivität, die durch das direkte Einblasen der zerkleinerten Einsatzmaterialien in die Schmelzzone resultiert. Durch die daraus entstehende hohe Schmelzgeschwindigkeit kann ein großer Massendurchsatz realisiert werden.

### Kompaktierung und Pelletierung

Eine große Verlustquelle für Edelmetalle wie Gold sind unter anderem Filterstäube aus Aufbereitungs- und Zerkleinerungsprozessen des Elektronikschrotts. Aufgrund der kleinen Größe edelmetallhaltiger Bauteile in Elektronikgeräten wird diese Fraktion verstärkt über die Absaugung ausgetragen. Um auch diese Fraktion der Wertschöpfungskette wieder zuzuführen, wird ein spezieller Konditionierungsprozess entwickelt, in dem aus den Filterstäuben autogene Pellets für den metallurgischen Einschmelzprozess hergestellt werden. Der Fokus liegt hier auf der Zusammensetzung der Pellets hinsichtlich der optimalen Nutzung der im Staub enthaltenen Kohlenwasserstoffe als Energieträger sowie der Komposition der Schlackenzusätze. Diese spielen neben dem Einsatz als Bindemittel eine übergeordnete Rolle als Flussmittel zur Beeinflussung der



Bild 3: Nass-Chemische Wertmetall-Rückgewinnung aus Elektronikschrott in der Kaskadenstraße.  
Foto: Martin Braun

Viskosität und des Schmelzpunktes. Diese Eigenschaften sind von Bedeutung, um Verluste durch Metalleintrag in die Schlacke zu vermeiden und die Zielmetalle in einer Metallphase zu sammeln.

### Hydrometallurgie

Hydrometallurgische Verfahren weisen zwei prozesstechnische Vorteile gegenüber konventionellen Vorgehensweisen auf, die speziell für den komplexen Rohstoff Elektronikschrott genutzt werden können. Zum einen ermöglichen diese nass-chemischen Verfahren eine äußerst selektive Metallgewinnung und zum anderen eine kosteneffiziente Rückgewinnung niedrig konzentrierter Elemente. Durch die Wahl der Chemikalien sowie Einstellung der Prozessparameter können gezielt Elemente extrahiert und anschließend separiert werden. Ein untersuchtes Behandlungsverfahren zielt

auf die direkte Behandlung von Elektronikschrott. Hierdurch können Metalle, die nicht durch eine Kunststoffschicht bedeckt sind, ohne Vorbehandlungsschritte extrahiert werden. Weitere Metalle, die sich noch unter der chemisch beständigen Kunststoffschicht befinden, werden nicht angegriffen und können in einem späteren Prozess gewonnen werden. Dies ist für die Lötmetalle Blei und Zinn aber auch für Gold auf elektrischen Kontakten möglich. Speziell die Rückgewinnung von Gold erweist sich mit dieser Methode als sinnvoll, da es einen Großteil des Wertes der im Elektronikschrott enthaltenen Metalle ausmacht. Durch die gezielte Verknüpfung der Teilprozesse lässt sich für jeden Einsatzstoff ein Verfahrenskonzept erstellen, das der Komplexität des Rohstoffs gerecht wird. Das Konzept verspricht einen effizienten Recyclingprozess, mit welchem die enormen Schrottmengen mit

minimalen Vor- und Aufbereitungsarbeiten bewältigt werden können.

---

### Autoren

Alexander Birich, Nikolaus Borowski, Fabian Diaz, Benedikt Flerus und Anna Trentmann (alle M.Sc.) sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling und Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie.

---

# Ressourcenkritische Legierungselemente einsparen

## Neue Konzepte für Werkzeugstähle

New alloying concepts for hot work tool steels have been developed using synergistic precipitation hardening effects in order to reduce the content of resource-critical elements. Intermetallic precipitates based on less critical raw materials were used aside from the reduced carbide content to adjust the required material properties. Due to the combination of different strengthening phases, a superior thermal stability of the material could be reached. High resolution atom probe tomography (APT) analyses of the material structure reveal the combined precipitation of nm-sized carbides and intermetallic particles, strengthening the matrix. With the new alloying concept for hot work tool steels, the overall content of carbide forming elements could be reduced by 68 % and the alloying costs, in the form of an alloy surcharge, by 21 %. On the basis of attractive material properties in combination with possible savings, current investigations concentrate on the industrial implementation and the material behavior during service.

Das Institut für Eisenhüttenkunde hat neue Legierungskonzepte für Warmarbeitsstähle entwickelt, die synergistische Aushärtungseffekte nutzen, um den Legierungsgehalt ressourcenkritischer Elemente zu reduzieren. Intermetallische Phasen auf Basis leichter verfügbarer Rohstoffe dienen neben Karbiden dazu, die geforderten Werkstoffeigenschaften einzustellen. Durch die Kombination verschiedener Ausscheidungsstrukturen konnte eine Verbesserung der thermischen Stabilität des Werkstoffes erzielt werden. Eine hochauflösende Analyse der Werkstoffstruktur mittels Atomsondentomographie, kurz APT, zeigt die kombinierte Ausscheidungsbildung von Karbiden und intermetallischen Phasen im Nanometer-Maßstab. Mit dem neuen Legierungskonzept für Warmarbeitsstähle konnte der Anteil karbidbildender Elemente um bis zu 68 Prozent und die Werkstoffkosten, abgebildet durch den Legierungszuschlag, um 21 Prozent reduziert werden. Aufgrund der attraktiven Kombination aus Werkstoffeigenschaften und Einsparpotenzial wird derzeit die industrielle Umsetzung des Werkstoffkonzeptes angestrebt, ihr soll sich dann eine Werkzeugprüfung unter Betriebsbedingungen anschließen.

Qualitativ hochwertige Werkzeugstähle sind ein Schlüsselfaktor für die industrielle Produktion verschiedenster Güter und gewährleisten eine hohe Produktivität zahlreicher Unternehmen. Das gilt für die Herstellung und Verarbeitung metallischer Bauteile ebenso wie für die Be- und Verarbeitung von Glas und Faserverbundwerkstoffen. Demnach ist deren Verfügbarkeit für Werkzeugstahlhersteller und industrielle Anwender – darunter die Werkzeugbauer, Gesenkschmiedebetriebe, Druckgießer und Strangpresser – von sehr hoher Relevanz.

Insbesondere bei den Verfahren der Warmformgebung sind die Werkzeugwerkstoffe einem komplexen Kollektiv unterschiedlicher mechanischer und thermischer Belastungen ausgesetzt. Das erforderliche Eigenschaftsprofil eingesetzter Werkstoffe lässt sich somit





durch eine hohe Temperatur und Temperaturwechselbeständigkeit, eine gute Warmfestigkeit und Zähigkeit sowie einen hohen Verschleißwiderstand beschreiben. Als Werkzeugwerkstoffe mit einer Einsatztemperatur über 200°C werden vornehmlich Warmarbeitsstähle eingesetzt, die durch die Zugabe der Legierungselemente Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram ihre spezifischen Eigenschaften erhalten. Diese Elemente verbinden sich bei der Wärmebehandlung mit dem enthaltenen Kohlenstoff zu harten Partikeln, den Karbiden, die in der Werkstoffmatrix ausgeschieden werden und eine hohe Temperaturstabilität sowie ausreichende Verschleißbeständigkeit gewährleisten. Bei sehr hoch beanspruchten Werkzeugen wird zudem das Element Cobalt verwendet, um eine hohe thermische Stabilität des Werk-

stoffes zu gewährleisten. In Bild 5 sind die Legierungselemente aufgeführt. Einem Bericht der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2014 zur Folge sind vor allem die Elemente Chrom, Cobalt und Wolfram als kritisch in Bezug auf ihre mittel- bis langfristige Verfügbarkeit zu bewerten. Dabei spielt neben politischen Unsicherheiten in den jeweiligen Förderländern auch die lokale Konzentration der Rohstoffe auf wenige Abbaugebiete eine entscheidende Rolle, die eine ausreichende Verfügbarkeit nicht sicher gewährleistet. In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundvorhaben der Initiative „MatRessource“ wurden neue Legierungskonzepte für Warmarbeitsstähle am Institut für Eisenhüttenkunde gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie

Bild 1: Semi-Product Simulation Center am Institut für Eisenhüttenkunde.  
Foto: Peter Winandy



Bild 2-4: Automatisierte Werkstoffverarbeitung am Semi-Product Simulation Center. Gussblöcke werden mittels Roboter und Schmiedepresse zu Vierkantstangen als Vormaterial für die weitere Werkstoffcharakterisierung verarbeitet.  
Fotos: Peter Winandy

entwickelt. Die Zielsetzung bestand darin, den Anteil ressourcenkritischer Rohstoffe durch den Einsatz alternativer Aushärtungsphasen zu reduzieren. Der Forschungsansatz beruht darauf, Aushärtungseffekte, die durch das förderliche Zusammenwirken mehrerer Stoffe entstehen, mit einem reduzierten Karbidgehalt und der Ausscheidung intermetallischer Phasen auf Basis leichter verfügbarer Rohstoffe zu nutzen. So kann der Anteil ressourcenkritischer Rohstoffe verringert werden.

So wurden verschiedene Legierungskonzepte erarbeitet, deren Umsetzbarkeit überprüft und das Eigenschaftsprofil bestimmt. Die Legierungen wurden im Institut für Eisenhüttenkunde mittels Vakuum-Induktionsofen erschmolzen, zu 80-Kilogramm-Blöcken

vergossen und am Semi-Product Simulation Center mit einer Schmiedepresse und Öfen für die Wärmebehandlung verarbeitet. Nach erfolgreicher Verarbeitung und Wärmebehandlung des Versuchsmaterials wurden die neuen Werkstoffkonzepte hinsichtlich ihrer mechanisch-thermischen Eigenschaften charakterisiert. Ein Maß für die thermische Stabilität eines Warmarbeitsstahls ist das Anlassverhalten, dargestellt als Verlauf der Werkstoffhärte in Abhängigkeit der Anlass-temperatur. Je höher die verbleibende Härte eines Werkstoffes mit steigender Anlass-temperatur, desto höher seine Temperaturbeständigkeit. Dargestellt ist das Anlassverhalten einer entwickelten Modelllegierung im Vergleich zu einem herkömmlich eingesetzten Warmarbeitsstahl. Es ist ersichtlich, dass

durch die kombinierte Aushärtung von Karbiden und intermetallischen Phasen eine Verbesserung der thermischen Stabilität mit dem neuen Werkstoffkonzept erreicht wird. Der Gehalt karbidbildender Elemente wurde bei der Modelllegierung durch den Zusatz intermetallischer Aushärtungsphasen um 68 Prozent reduziert.

Für eine Aushärtung der Werkstoffmatrix sind sehr feine Ausscheidungen mit einer Größe unter zehn Nanometer besonders effektiv. Die Charakterisierung dieser Phasen erfordert einen hohen messtechnischen Aufwand, der nur mit hochauflösenden Analysemethoden realisiert werden kann. Für eine Charakterisierung vorliegender Ausscheidungen wurde ein atomar auflösendes Untersuchungsverfahren, die Atomsondentomographie, verwendet.



|                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Einsatzstoff                                                        |  |  |  |  |  |
| Element                                                             | Cobalt                                                                              | Chrom                                                                               | Molybdän                                                                            | Vanadium                                                                             | Wolfram                                                                               |
| Hauptförderländer <sup>1,2</sup>                                    | Kongo 56%<br>China 6%<br>Russland 6%<br>Sambia 6%                                   | Südafrika 43%<br>Kasachstan 20%<br>Indien 13%                                       | China 38%<br>USA 25%<br>Chile 16%                                                   | China 36%<br>Südafrika 36%<br>Russland 26%                                           | China 85%<br>Russland 4%<br>Bolivien 2%                                               |
| Typische Legierungsmassenanteile in Warmarbeitsstählen <sup>3</sup> | bis 4,5 %                                                                           | 1 – 12 %                                                                            | bis 5 %                                                                             | bis 2 %                                                                              | bis 9 %                                                                               |

<sup>1</sup> European Commission, The European Critical Raw Materials review, Brussels, 2014 ; <sup>2</sup> European Commission, Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010 ; <sup>3</sup> E. Moeller, Handbuch Konstruktionswerkstoffe: Auswahl, Eigenschaften, Anwendung. 2., überarb. Auflage, Hanser, München, 2014.

Bild 5: Legierungselemente für Warmarbeitsstähle.



Bild 6: Umformung eines Gussblocks an der Schmiedepresse.

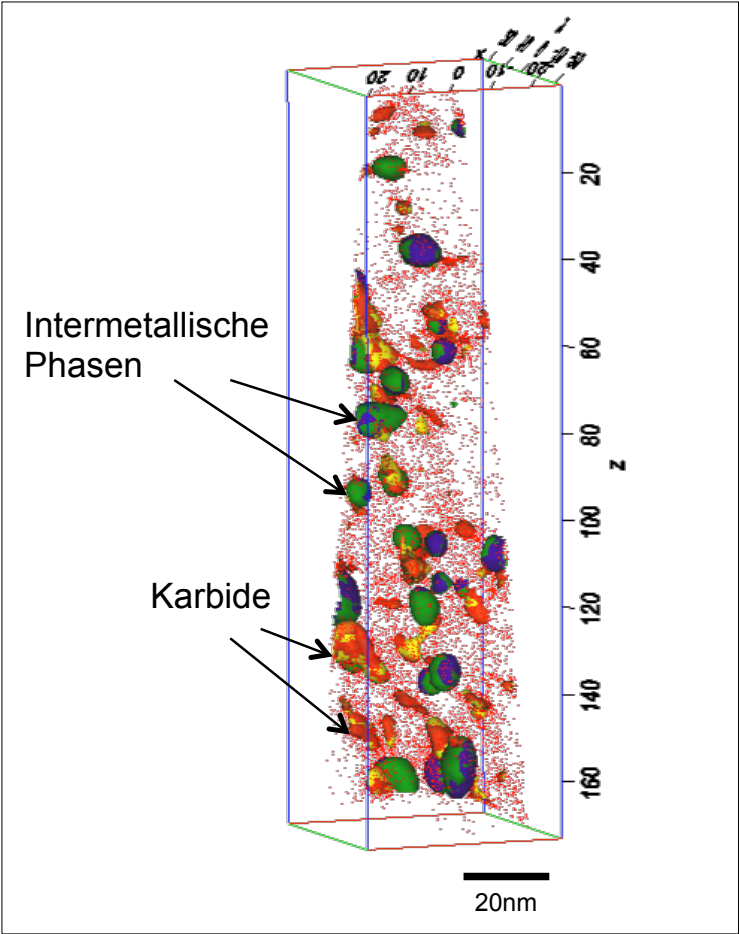


Bild 7: Atomsondentomographie: Rekonstruktion der Werkstoffstruktur in atomarer Auflösung. Darstellung von Karbiden und intermetallischen Phasen.

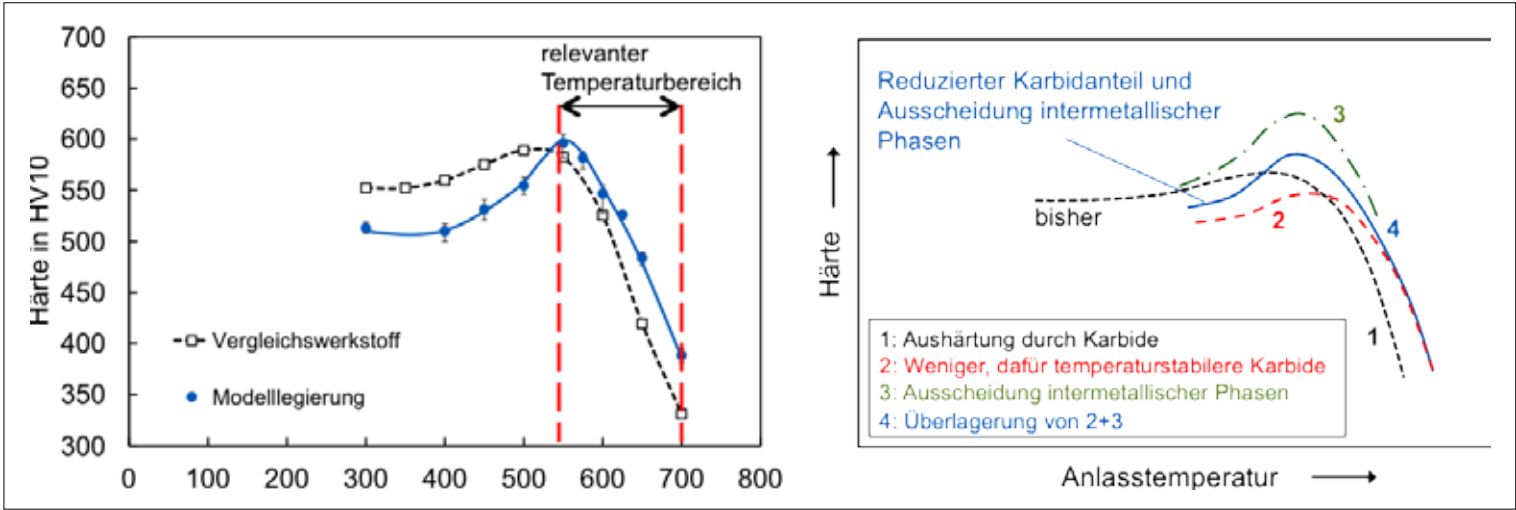


Bild 8: Anlassverhalten: Je höher das Härteniveau mit zunehmender Anlasstemperatur, desto höher die thermische Stabilität des Werkstoffes.

Dieses Verfahren ermöglicht die Analyse nanometergroßer Probenvolumina hinsichtlich ihrer Elementverteilung auf atomarer Ebene. Bild 7 zeigt die Rekonstruktion eines etwa 40 mal 40 mal 160 Kubiknanometer großen Probenvolumens. Zu erkennen sind verschiedene Ausscheidungsstrukturen in der Werkstoffmatrix, die aus feinen Karbiden (rot-gelb) und intermetallischen Ausscheidungen (blau-grün) bestehen. Neben attraktiven Werkstoffeigenschaften konnten mit dem entwickelten Werkstoffkon-

zept bis zu 68 Prozent der karbidbildenden Legierungselemente eingespart und die Kosten für die Legierungszuschläge um bis zu 21 Prozent reduziert werden. Aufgrund der aussichtsreichen Ergebnisse erfolgt derzeit die industrielle Umsetzung des Werkstoffkonzeptes. Die Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit der Deutsche Edelstahlwerke GmbH und dem Institut für Umformtechnik GmbH (IFU), einem kooperierenden Institut der Fachhochschule Südwestfalen, im Rahmen eines vom Bundesministerium für

Bildung und Forschung geförderten Verbundvorhabens erarbeitet.

### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck ist Inhaber des Lehrstuhls für Eisenhüttenkunde und Leiter des Instituts für Eisenhüttenkunde. Dipl.-Ing. Alexander Zimmermann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenhüttenkunde.



Foto: Peter Winandy

Anzeige

**TSR**

THE METAL COMPANY

## Das ist kein Schrott. Das ist die Zukunft

Gestern Katalysator, morgen Teil eines Smartphones, übermorgen Elektromotor: Damit Metall auch künftig zurückgewonnen und recycelt werden kann, brauchen wir innovative Technik – und Mitarbeiter, die diese konzipieren und realisieren. Entdecke mit uns, was du morgen sein kannst: [tsr.eu/karriere](https://tsr.eu/karriere)

TSR Recycling GmbH & Co. KG // Hafenstraße 98 // 46242 Bottrop // T +49 2041 7060-0  
F + 49 2041 7710-999 // [info@tsr.eu](mailto:info@tsr.eu) // [tsr.eu](https://tsr.eu) // Ein Unternehmen der REMONDIS-Gruppe

# Stahlkochen mit Kirschkernen

Unkonventionelle Einsatzstoffe  
für die Eisen- und Stahlmetallurgie

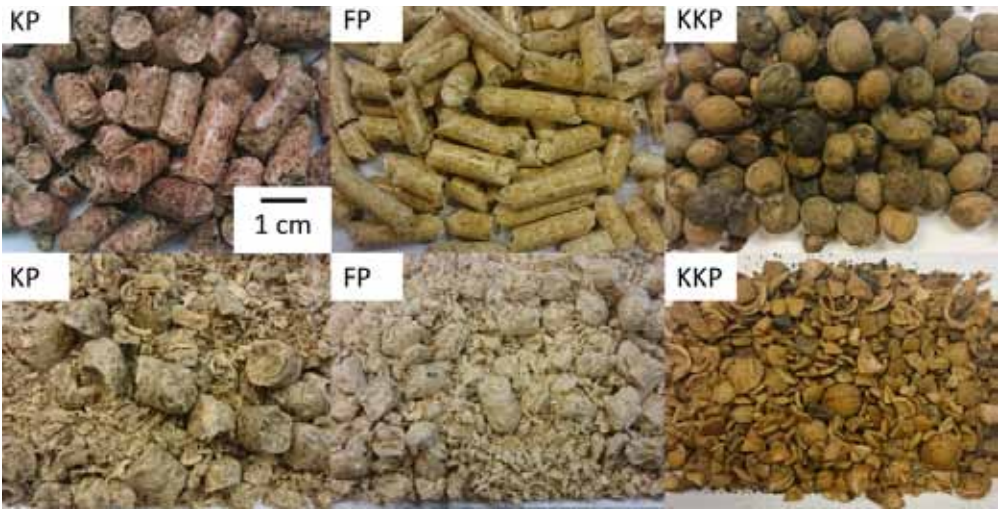


Bild 1: Herkömmliche Biomasse in Form von Kieferpellets (links), Fichtepellets (Mitte) und Kirschkernen (rechts).

Increasingly scarce resources and climate change are major challenges in view of sustainable mass production of high quality steel with acceptable costs. This contribution gives an overview on new developments in the fields of use of renewable biomass and waste plastics by means of gasification, injection, mixing and embedding in pellets, composites, coke and sinter. The results are mostly based on recent and current research activities of the IEHK related to resources and environmental challenges.

Die knapper werdenden Ressourcen fossiler Brennstoffe und der steigende Druck zur Verminderung von Umweltbelastungen und Begrenzung des Klimawandels stellen große Herausforderungen für die wirtschaftliche Massenherstellung von hochwertigen Stahlwerkstoffen dar. Neben der konventionellen Hochofenroute, bestehend aus Kokerei, Sinteranlage, Hochofen und Konverter, werden viele Stahlsorten auch aus Recyclingmaterial in Form von Stahlschrotten im Elektrolichtbogenofen hergestellt. Für die konventionelle Route werden Einsatzstoffe wie Eisenerz-agglomerate, Kohle und Koks benötigt. Diese können langfristig den oben genannten Herausforderungen nicht gerecht werden und

müssen daher in ihrer Zusammensetzung optimiert oder gar ersetzt werden. Hierfür werden neue, eher unkonventionelle Einsatzstoffe getestet und auf ihre mechanischen sowie physikalisch-chemischen Eigenschaften hin untersucht und entsprechend der Prozesse beurteilt. Der Einsatz von Biomasseprodukten, Altkunststoffen, metallurgischen Abgasen, selbstreduzierenden Agglomeraten und Kompositen, Mini- und Mikropellets, niedrig reduziertem Eisen sowie Kohlebriketts wird intensiv erforscht und zum Teil schon in die betriebliche Praxis implementiert. Am Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl wurden unkonventionelle Energieträger untersucht.

**Bioprodukte: Direkter Einsatz, Zumischung und Anwendung**

Der Einsatz von Biomasse als erneuerbare Energie- und Kohlenstoffquelle kann zur Verringerung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in der Industrie beitragen, da während der Photosynthese von Pflanzen Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) zu Glucose reagieren, welche erster Baustein der Biomasse in der Form C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> ist. Da Biomasse in ihrem Rohzustand für einen Einsatz in der Eisen- und Stahlindustrie nicht geeignet ist, wird sie während der Vorbehandlung in inerte Atmosphäre erhitzt. Dabei ändert sie ihre mechanischen wie auch physikalisch-chemischen Eigenschaften so sehr, dass sie eher einer Kohle als der ursprünglichen Biomasse entspricht. Die Grundbestandteile der Bio-

Wärmeerzeugung genutzt. In industriellen Anwendungen finden sich viele Möglichkeiten zum Ersatz fossiler Brennstoffe. Im Wirbelschichtreaktor wird Biomasse zur Erzeugung von hoch wasserstoff- und kohlenstoffmonoxidhaltigem Prozessgas eingesetzt. Da der Prozess in der Wirbelschicht vergleichsweise langsam ist, kann auch langsam reagierendes Material eingesetzt werden. Biomasse birgt einen hohen Sauerstoffgehalt. Er ermöglicht den Einsatz von geringeren Sauerstoffmengen zur Vergasung und Verbrennung des Materials. Ein hoher Gehalt flüchtiger Bestandteile senkt die Zündtemperatur und der geringe Aschegehalt führt zu einem sehr hohen Materialumsetzungsgrad von über 90 Prozent. Die vorbehandelte Biomasse kann direkt in

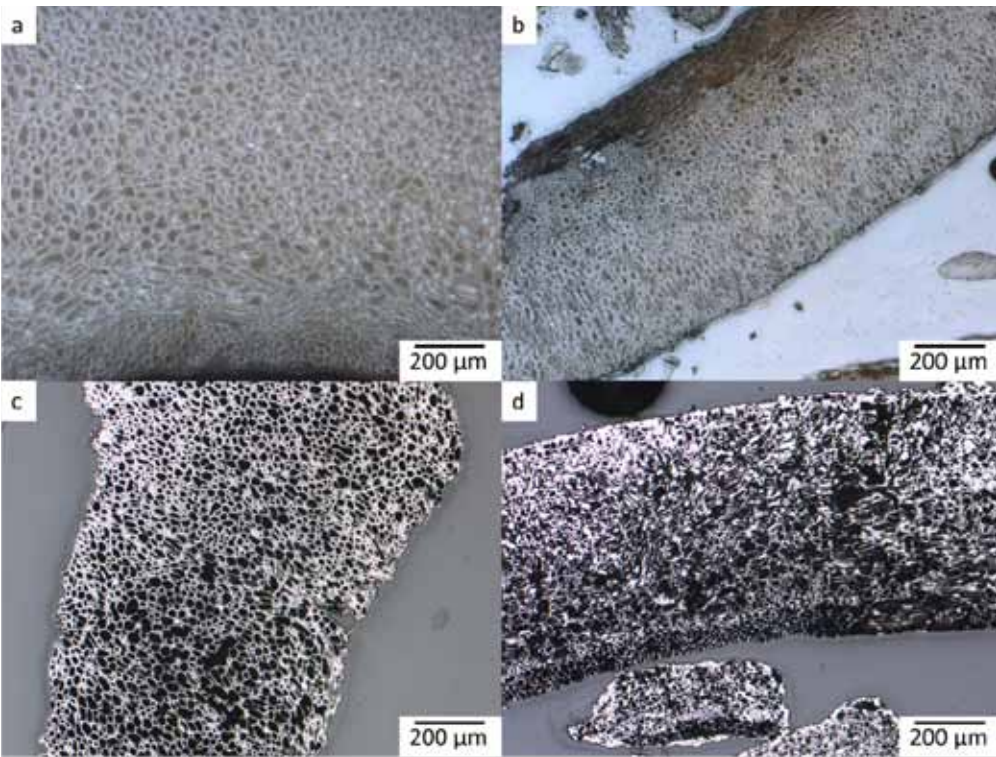


Bild 2: Änderung der Struktur von Kirschkernen während der Vorbehandlung:  
(a) Rohzustand,  
(b) 300 Grad Celsius,  
(c) 600 Grad Celsius,  
(d) 1200 Grad Celsius.

masse, Cellulose, Hemicellulose und Lignin werden dabei aufgespalten und die flüchtigen Bestandteile aus dem Material ausgetrieben. Dabei bleibt ein kohleähnlicher Brennstoff zurück. Der Fokus der aktuellen Forschung liegt dabei nicht auf dem Einsatz für den Prozess angebauter Biomasse, sondern auf der Nutzung von Reststoffen, die beispielsweise in der Nahrungsmittel- oder Holzindustrie anfallen. Beispiele dieser Bioreststoffe stellen Holzpellets aus Sägewerksrückständen sowie Kirschkerne oder Palmkernschalen dar. Durch das Pressen zu Pellets werden Holzspäne und sonstige Rückstände nutzbar gemacht und auch im privaten Haushalt zur

den Hochofen sowie in andere Schachtöfen im pulverisierten Zustand eingeblasen werden und damit die heutzutage übliche fossile Einblaskohle partiell oder komplett ersetzen. Diese Technologie wird bereits an kleinen Hochofen in Brasilien eingesetzt und momentan für moderne große Kokshochöfen untersucht. Der für die Koksherstellung notwendigen Kokskohle wird in aktuellen Forschungsarbeiten vorbehandelte Biomasse zugeführt, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Hierbei darf der Hochofenbetrieb jedoch nicht wesentlich gestört werden, um weiterhin hohe Qualität bei gleichbleibender Produktivität zu gewährleisten.

532X 15KV WD:15MM S:00000 P:00000  
50UM

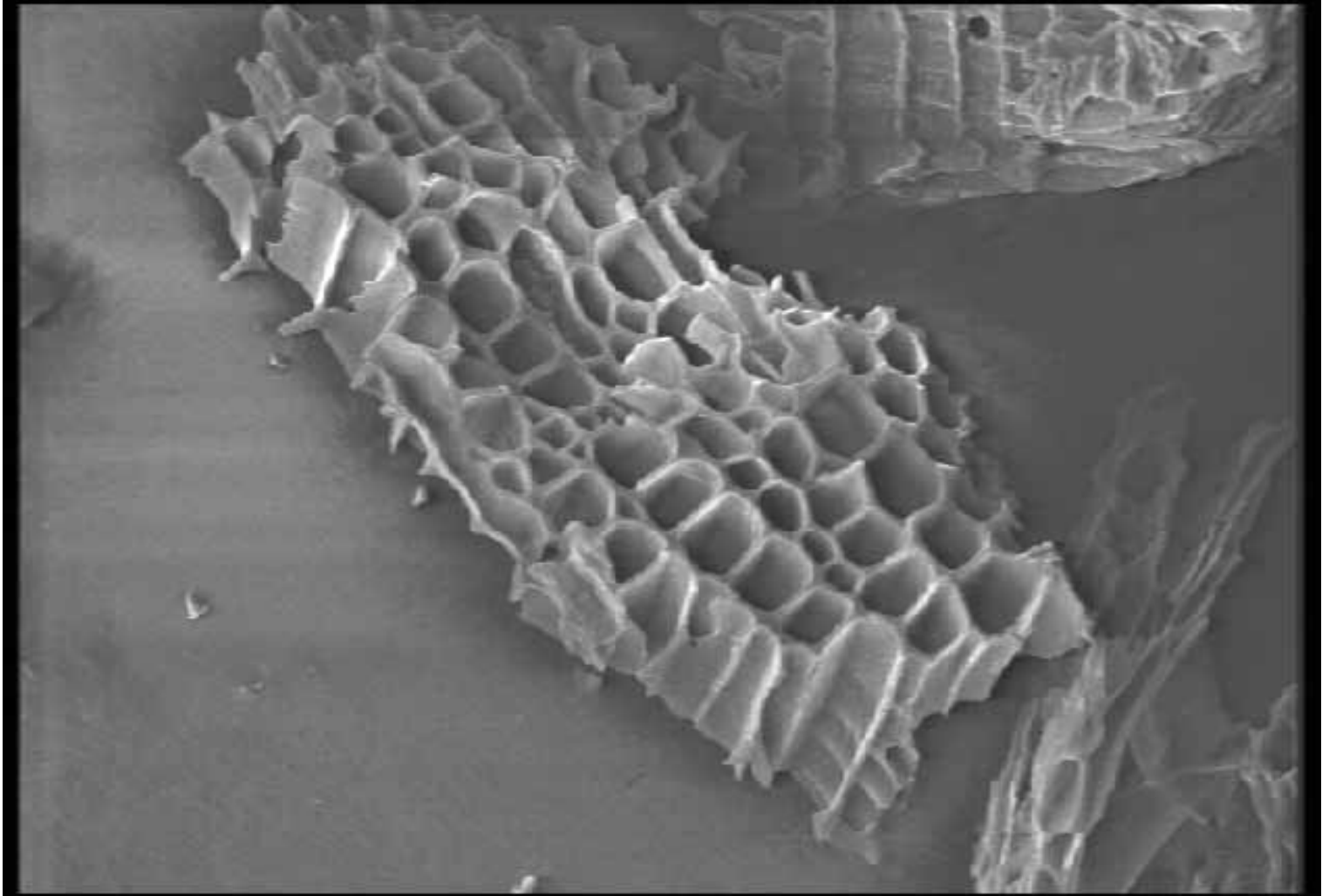


Bild 3: Mikrostruktur von Holzkohle hergestellt aus Eukalyptus.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Biomassetypen wie Holz, Gräser, Schalen und Kerne finden sich auch hier Materialien, die zum Ersatz von fossiler Kohle eingesetzt werden können. Eine Zumischung von fünf bis zehn Prozent vorbehandelter Biomasse in der Kohlemischung verändert die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Koks nur geringfügig, sodass auch hier fossile Brennstoffe eingespart werden können. Um die Festigkeit nicht zu verschlechtern, können Hölzer oder Kerne und Schalen eingesetzt werden, da diese aufgrund ihrer Zellstruktur hohe Festigkeiten aufweisen.

Weiterhin kann Biomasse auch zur Herstellung von Eisenerzsinter und von selbstreduzierenden Pellets eingesetzt werden. Bei der Sinterherstellung können bis zu 25 Prozent der Kohlenstoffträger durch vorbehandelte Biomasse ersetzt werden, um so eine gleichbleibende Qualität zu erreichen. Feinerze und Biomasse werden gemischt, zu kleinen runden Pellets gedreht und anschließend gebacken. Durch den Kohlenstoff im Pellet wird

bei hohen Temperaturen das Eisenerz reduziert und im Inneren der Pellets entstehen Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid. Durch einen geringen Anteil an Biomasse in der Pelletmischung können durch die große Kontaktfläche im Hochofen Koks und Einblaskohle eingespart werden.

#### **Kunststoffabfälle: Direkter Einsatz, Zumischung und Anwendung**

Die Kunststoffproduktion wurde in den letzten Jahrzehnten drastisch auf circa 300 Millionen Tonnen pro Jahr weltweit, davon etwa 60 Millionen Tonnen pro Jahr in der Europäischen Union, erhöht. Die Recyclingmöglichkeiten von Kunststoffen ermöglichen einen erneuten Einsatz in ihrer ursprünglichen Form oder in neuen Produkten, allerdings fallen auch große Mengen an, bei denen eine Wiederverwendung nicht möglich ist. Diese Altkunststoffe müssen entsorgt werden. Eine mögliche Verwendung ist ebenfalls der Einsatz in der Eisen- und Stahlindustrie. Die Abfälle können dafür eine mechanische und thermische Behandlung durchlaufen und dann in Form von

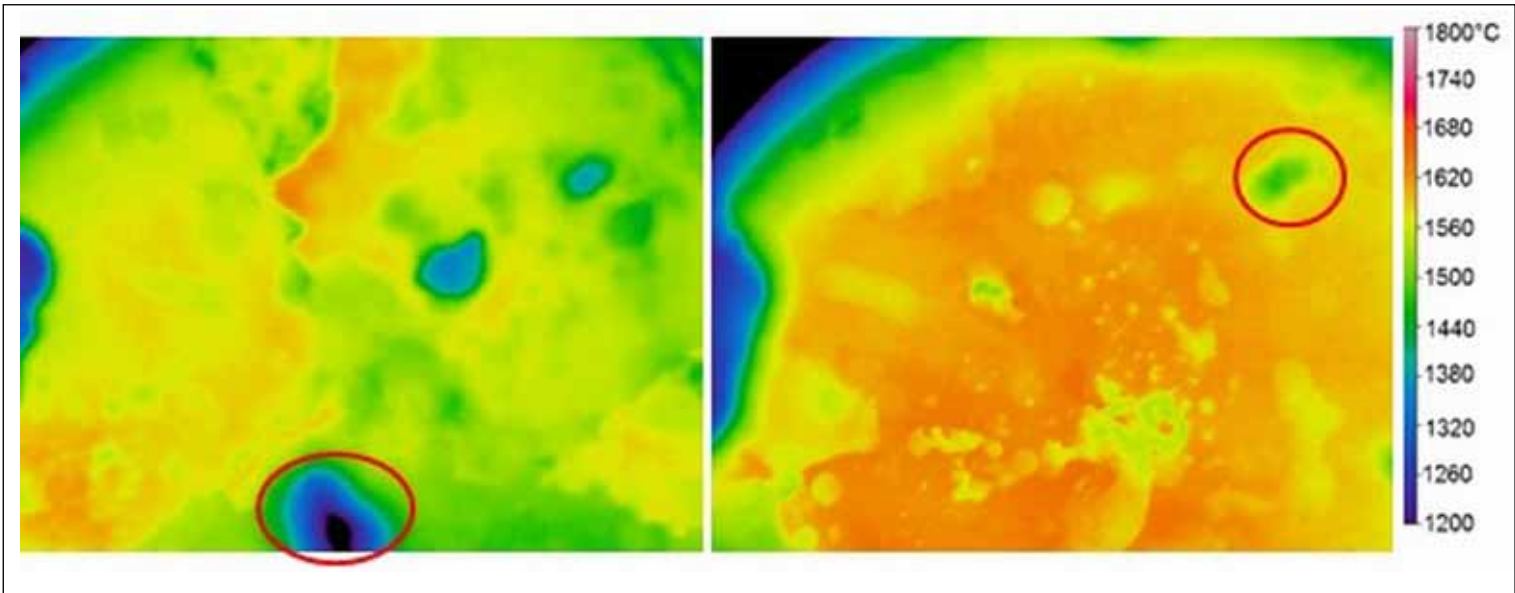


Bild 4: Holzkohlepartikel auf der Koksoberfläche beim Einblasen in den Hochofen.

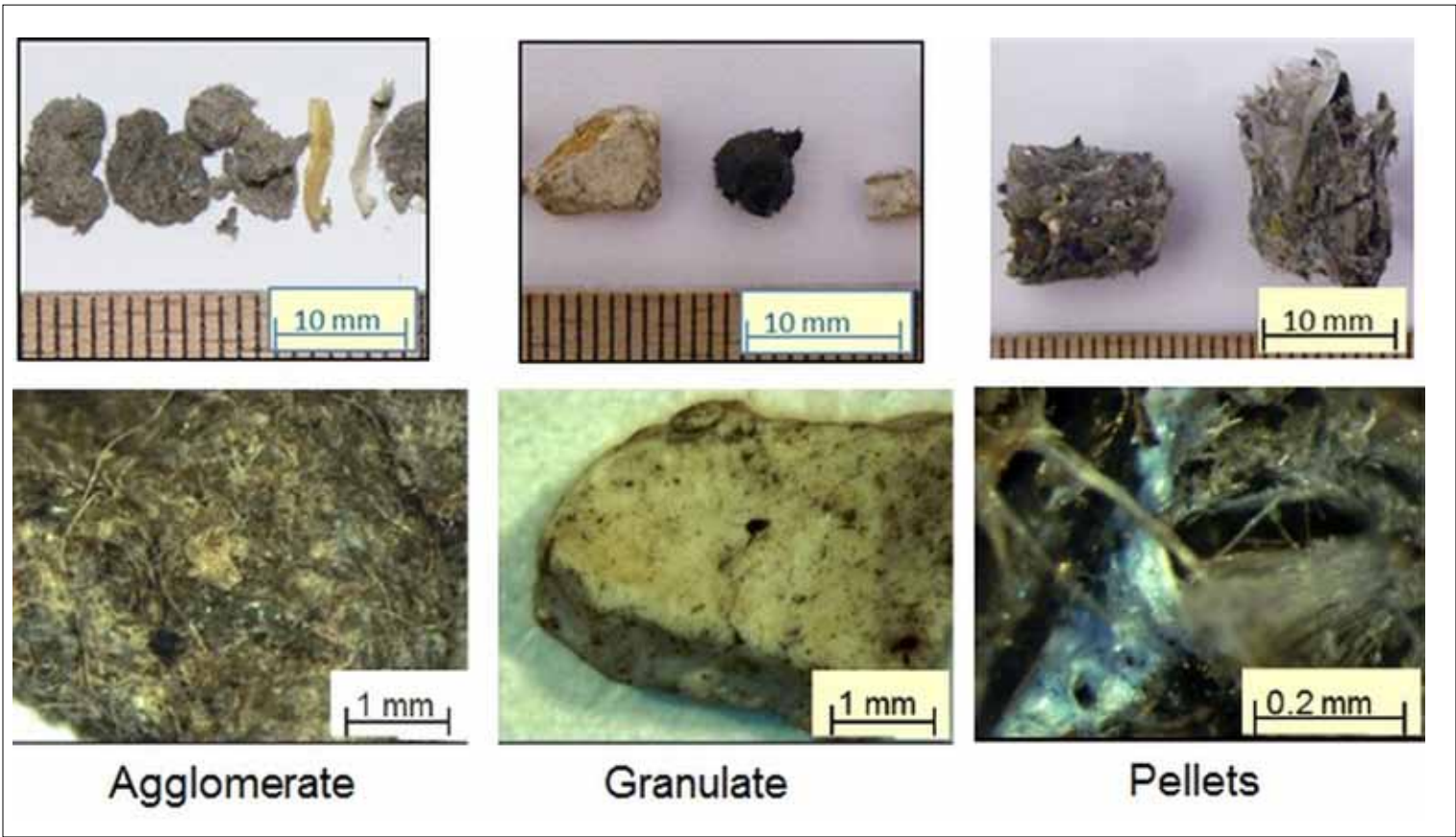


Bild 5: Verfügbare Formen von Altkunststoffen.

Agglomeraten, Granulaten und Pellets genauso wie Bioprodukte eingeblasen, eingebettet oder vergast werden. Trotz vorhandener betrieblicher Erfahrungen mit dem Einblasen von Altkunststoffen in Deutschland, Japan und Österreich wurde ihre Umsetzung unter Hochofensimulationsbedingungen erst vor kurzem systematisch untersucht. Überraschend wurde festgestellt, dass trotz des extrem hohen Gehalts flüch-

tiger Bestandteile unverbrannte Restpartikel die simulierte Einblaszone des Hochofens verlassen. Dies bedeutet, dass kein vollständiger Umsatz der Materialien stattfindet. Um den Einfluss auf den gesamten Hochofenprozess zu ermitteln, wurde das Verhalten von Kunststoffen unter Hochofenbedingungen und der Anwesenheit von Hochofenkoks genauer untersucht.

### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Senk ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgie von Eisen und Stahl.  
Dr.-Ing. Alexander Babich ist und Mathias Schwarz war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl.

# Wie aus Glaswannensteinen ein gleichwertiger feuerfester Werkstoff wird

## Recyclingidee auf gleicher Wertschöpfungsebene

Refractory materials are a most difficult subject for recycling as microstructures infiltrated by liquid ashes or slags cannot easily be separated from undesired impurities. Therefore, the Department of Mineral Engineering has chosen alumina-zirconia-silica based backbone bricks of glass tanks for re-use as mechanically active materials. These AZS bricks have been produced by eutectic melting and, therefore, are constituted of parallel elongated  $ZrO_2$  particles in an alumina-silica matrix. Crushing these bricks to aggregates of 0.2 to 5 millimeters diameter allows for re-use as "fiber-reinforced" aggregates in another refractory matrix such as a castable. Testing of the new composites reveals that crack deflection, bedonding and fiber pull-out inside the aggregates contribute to a strong increase of fracture resistance.

Feuerfeste Werkstoffe müssen eine Vielzahl von Eigenschaften zuverlässig kombinieren: Mechanische Beständigkeit bei hohen Temperaturen, Thermoschockbeständigkeit bei schnellen Temperaturwechseln, Korrosionsbeständigkeit gegenüber aggressiven Medien wie Rauchgasatmosphäre, Schlacken und Metallschmelzen sowie spezifisch auf den Einbauort optimierte Eigenschaften wie hohe oder niedrige Wärmeleitfähigkeit. Da feuerfeste Werkstoffe überwiegend in großen Anlagen der Metallurgie, der Energietechnik, der Zementindustrie, der Glasindustrie sowie der Keramikindustrie zum Einsatz kommen, ist massenmäßig sehr viel hochwertiges Material in der Anwendung. Aufgrund der hohen Ansprüche an die mechanischen und chemischen Eigenschaften muss es ein definiertes Gefüge sowie einen festgelegten Phasenbestand aufweisen.

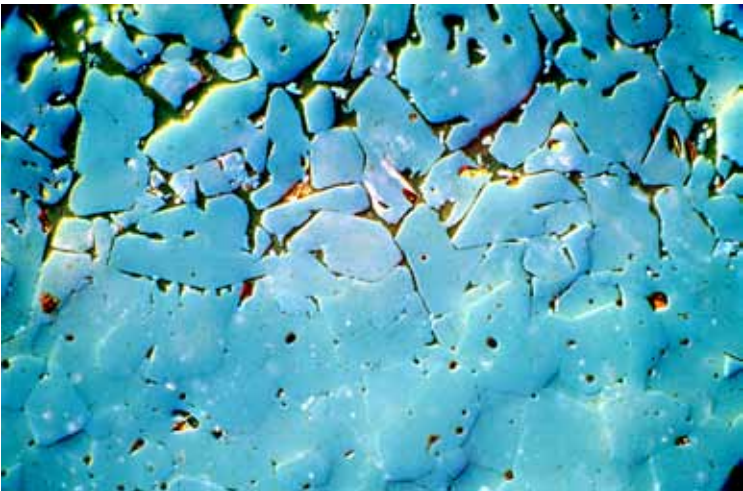


Bild 1: Angriff einer Steinkohleverbrennungsasche auf eine hochreine Aluminiumoxid-keramik. Zuerst werden die Korngrenzen infiltriert...

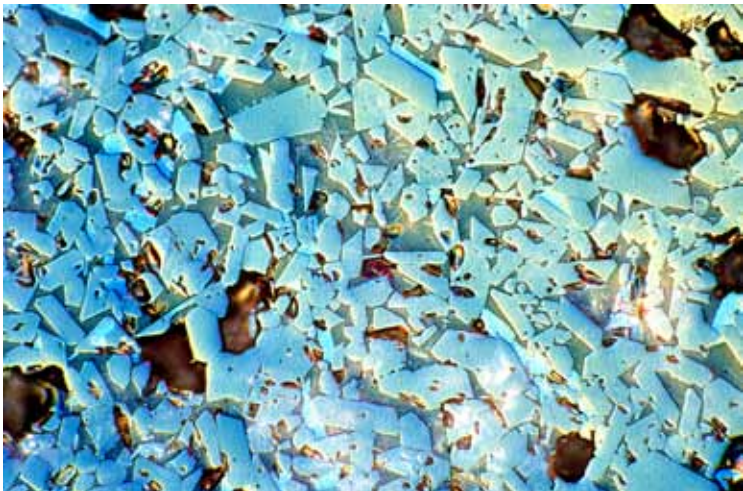


Bild 2: ...dann erodieren die isolierten Keramiktellchen durch Schlackenströmung – ein hoffnungsloser Fall für Recycling.

So werden für die Glasindustrie relativ reine Zirkoniumdioxid-Steine verwendet, die über zehn bis 14 Jahre dem dauerhaften korrosiven Angriff durch Alkalisilikat-Schmelzen bei Temperaturen um 1550°C standhalten müssen. Für spezielle Einsatzfälle, zum Beispiel in der Gasturbine, müssen zu diesen Materialien noch Oxide der Seltenen Erden hinzuge-mischt werden. Zirkoniumdioxid,  $ZrO_2$ , ist aber unter energetisch sehr aufwändigen Bedingungen aus dem natürlichen Mineral Zirkon,  $ZrSiO_4$ , zu gewinnen und muss nach-folgend durch chemische Prozesse von unerwünschten Spurenelementen gereinigt werden. Wirtschaftlich gesehen wird der  $ZrO_2$ -Markt zurzeit von China dominiert, da dieser Wirtschaftsraum aus Eigenbedarf nahezu alle verfügbaren Ressourcen aufkauft. Das Recycling feuerfester Steine zur Wiederverwertung in denselben Anwendungen sowie zur Rückgewinnung der Seltenen Erden liegt also sehr nahe.

Viele Unternehmungen, feuerfeste Erzeug-nisse am Ende ihres Lebenszyklus für die Wiederverwertung aufzubereiten, scheiterten an den erforderlichen hohen Qualitätsansprü-chen der Feuerfestindustrie in Bezug auf den hohen Reinheitsgrad. So gilt es, Anhaftungen von Schlacken, Aschen und Metallschmel-zen möglichst vollständig und effizient zu entfernen, da diese die Hochtemperaturei-genschaften wie Festigkeit und Kriechver-halten negativ beeinflussen. Dies wird umso schlimmer, je mehr die Risse durch Schmel-zen und Schlacken durchdrungen werden. Diese Verunreinigungen können dann nicht mehr mechanisch abgetrennt werden. Meis-tens gehen mit Anhaftungen und Infiltrati-onen noch Phasenneubildungen einher, die ohnehin nicht vom Steinmaterial abzutrennen sind. Aus Kostengründen verbieten sich auch chemische Aufbereitungsverfahren, falls nicht mit Edelmetallen oder teuren Seltenen Erden vermengte Feuerfeststoffe vorliegen.

Am Lehrstuhl für Keramik und feuerfeste Werkstoffe entstand die Idee zu einer an-deren Art von Recycling. Da sich die wirt-schaftliche Verwertung von Feuerfestmaterial aus chemisch komplexen Anwendungen wie Verbrennung (noch) verbietet, wurden Materialien aus der Glaserzeugung, so genannte Glaswannensteine, herangezogen, deren Verunreinigungen in Form von Glas-resten chemisch definierter sind. Hier finden so genannte AZS-Steine Anwendung, die aus Aluminiumoxid (A), Zirkoniumdioxid (Z) und Siliciumdioxid (S) bestehen. Diese Steine von acht bis 40 Kilogramm Gewicht werden „schmelzgegossen“: In einem Tiegel aus art-eigenem festen Material wird eine Rohstoff-mischung von etwa 500 bis 5.000 Kilogramm im Lichtbogenofen bis über den Schmelz-punkt erhitzt und in Formen abgegossen. Diese Formgebungsmethode ist zwar für keramische Werkstoffe ungewöhnlich, erlaubt aber die Herstellung großer und schwerer



Bild 3: Nahezu unangegriffene  $ZrO_2$ -Hintermauerung (grüngelb) einer Faserglaswanne mit Chromoxid-Steinen (schwarz). Idealer Fall für Recycling.



Bild 4:  $ZrO_2$ -Palisadensteine in einer Bildschirmglaswanne.

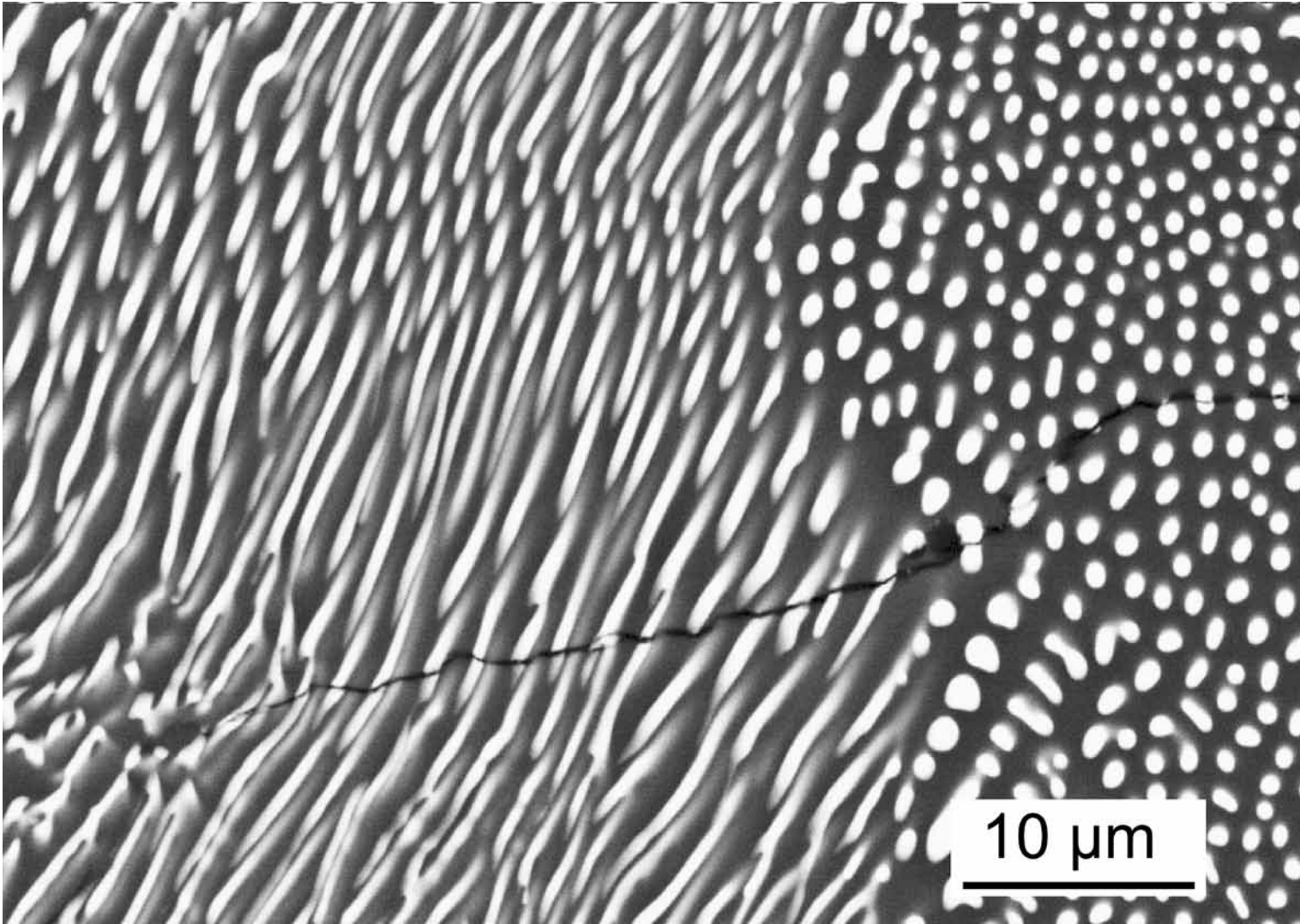


Bild 5: Eutektisches Gefüge eines AZS-Steins mit  $\text{ZrO}_2$ -Stäbchen in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ -Matrix; Anschliff im Rasterelektronenmikroskop.

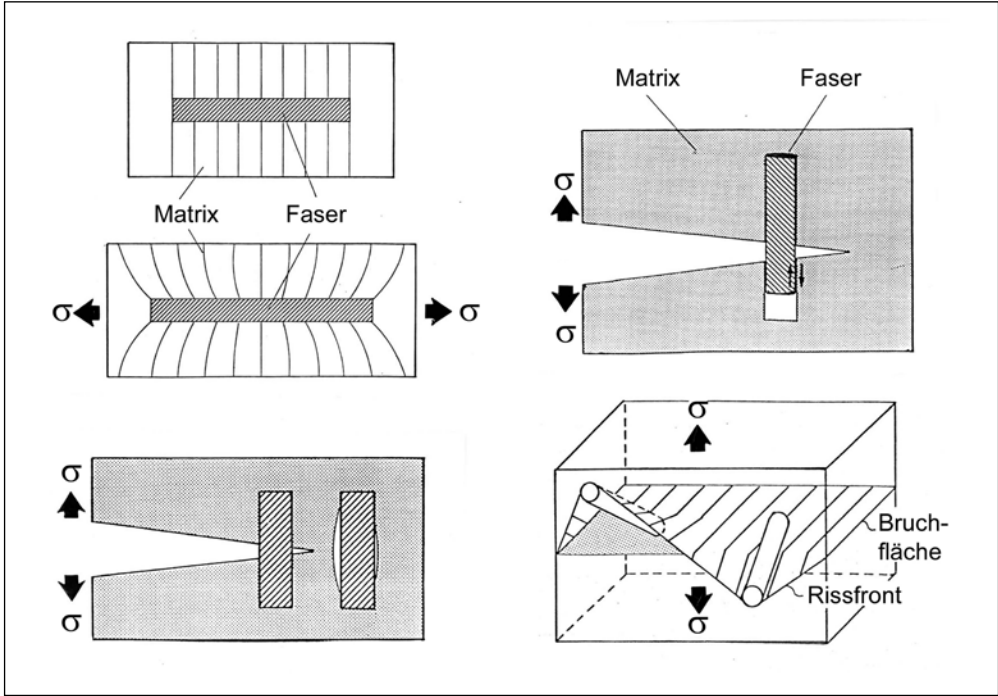


Bild 6: Mechanismus der Faserverstärkung: Oben links: Last-Übertragung von Matrix auf Faser; oben rechts: Herausziehen (Pull-out) von Fasern aus der Matrix; unten links: Parasitäre Rissbildung durch Faserbiegung (Debonding) vor der Rissfront; unten rechts: Rissablenkung zwischen zwei Fasern.

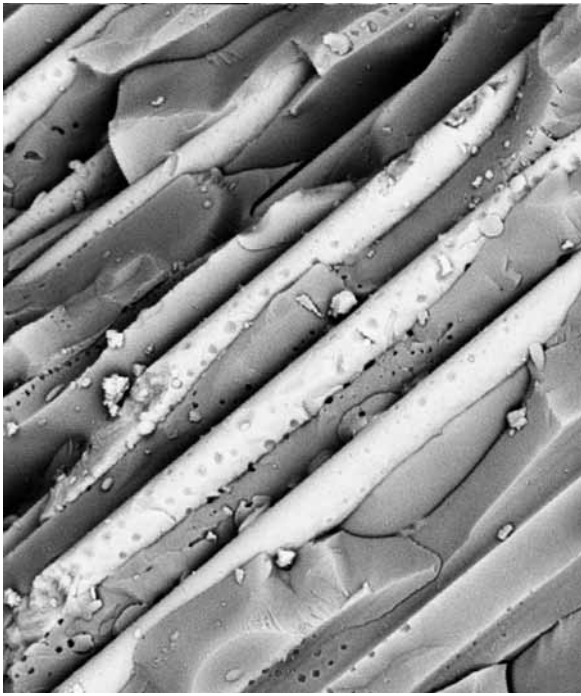


Bild 7: Bruchbild des eutektischen Gefüges, Herausschälen der Faser durch partiellen Pull-out.

Bauteile unter Vermeidung starker Schrumpfung. Das Erschmelzen dieser Steine erfolgt unter günstigen Bedingungen, wenn mit einer eutektischen Zusammensetzung gearbeitet wird, das heißt mit der maximalen Erniedrigung der Schmelztemperatur durch eine geeignete Stoffzusammensetzung. Dies wiederum hat bei der Erstarrung zur Folge, dass ein besonderer Gefügetyp entsteht, der durch verästelte oder stängelförmige, fast faserförmige  $ZrO_2$ -Ausscheidungen in einer Aluminiumoxid-Matrix mit Siliciumdioxid-Resen gekennzeichnet ist. Bedingt durch die langsamen Abkühlungstemperaturen reifen diese Gefüge zu geeigneter Größe heran und speichern aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnung der beteiligten Verbindungen innere elastische Spannungen. Die Recycling-Idee besteht nun darin, solche eutektischen Steine nach mechanischer Abtrennung der äußeren Glasanhaftungen auf eine Korngröße von 0,2 bis fünf Millimeter aufzumahlen und gewissermaßen als „faserverstärkte“ Keramikverbunde in Aggregatform als Zuschlagsstoffe zu Feuerbetonen zuzumischen. Hat der Beton unter Sinterbedingungen seine (Hochtemperatur-)Festigkeit

erreicht, so sorgen sowohl die Spannungen als auch die Faserform, unterstützt von der Phasenumwandlung des  $ZrO_2$ , für eine Ablenkung und Verzweigung von kleinen Rissen, die aufgrund einer äußeren Last oder durch Thermoschock induziert werden. Hiermit ist eine Erhöhung der Bruchzähigkeit zu verzeichnen, da sich die Risse gewissermaßen totlaufen oder in Richtungen geringerer Spannungen abgelenkt werden und somit zum Stillstand kommen. Das produktionsbedingte Gefüge wird also durch das Recycling zum Feuerbeton zur bruchmechanisch aktiven Komponente. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften solchermaßen verbesserter Feuerbetone im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1418 zeigte neben einer verbesserten Thermoschockbeständigkeit auch eine Erhöhung des Bruchwiderstands gegenüber Materialien mit Aggregaten aus Magnesium-stabilisiertem  $ZrO_2$  ohne besondere Gefügemerkmale. Es konnte also neben dem Effekt der Wiederverwertung ausgedienter Glaswannensteine auf einer gleichen Wertschöpfungsebene ein anderer feuerfester Werkstoff optimiert werden.

### Autoren

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Rainer Telle ist Inhaber des Lehrstuhls für Keramik und feuerfeste Werkstoffe.  
Jonas Schnieder, M. Sc., war bis Mai 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Keramik und feuerfeste Werkstoffe.

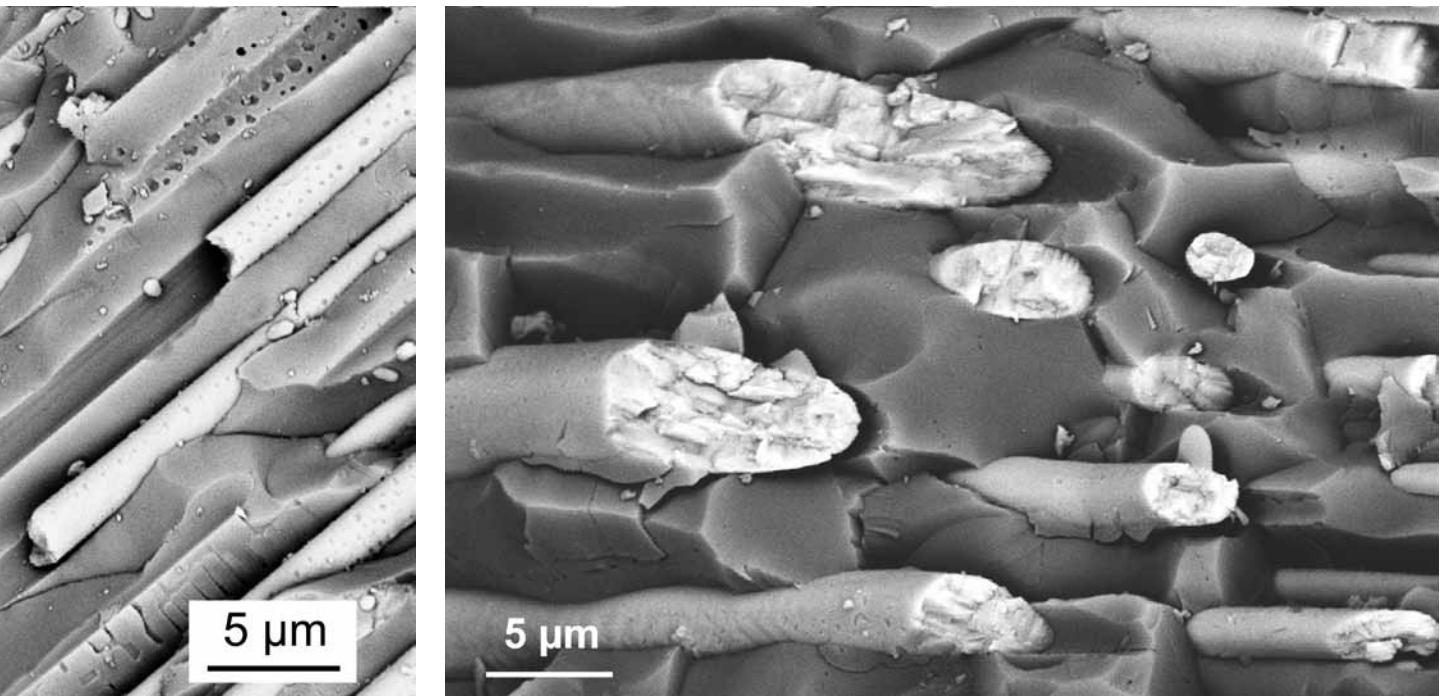


Bild 8: Faserbruch nach Debonding.

Bild 1: Insbesondere in energieintensiven Industrien treten Wertschöpfungsverluste auf.  
Foto: Martin Braun



Marcel Höhn, Peter Letmathe, Ilja Rabinovitch

# Kostenwirkungs- gradrechnung: gut für Wirtschaftlichkeit und Umwelt

## Zyklische Kostenbeziehungen und Wertschöpfungsverluste

The Chair of Management Accounting at RWTH Aachen University focuses on managerial decision-making and the optimization of value chains in industry at both the strategic and the operational level. Since innovation, feasibility of new projects and business modelling are only a few of the challenges faced by many enterprises, there is a need for innovative methods which calculate all relevant costs along a resource's or product's value chain.

Cost efficiency accounting is one such method which allows for the detection of costs of waste (value losses) during a product's

lifetime. Contrary to the traditional view, which aims to allocate costs from inputs to outputs, cyclic cost relationships play an important role for this method. A cycle-oriented viewpoint of the cost consideration enables firms to get deeper, value-oriented insights into their own processes, thus offering an opportunity for an increased awareness of the efficient use of resources, environmental protection and pollution prevention. As a result, optimized flows of materials and energy through the respective value chains lead to substantial cost savings and can even change the structure of entire industries.

Der Lehrstuhl für Controlling ist auf das industrielle Controlling ausgerichtet. Unter anderem werden die Realisierbarkeit von neuen Geschäftsmodellen und der wirtschaftliche Erfolg von Innovationen analysiert. Um wirtschaftliche Erfolgsaussichten abschätzen zu können, reicht es nicht aus, die aktuellen Kosten zu erfassen. Vielmehr werden tiefere Analysen benötigt, um den Kundennutzen und die in der Zukunft erreichbaren Kosten von neuen Produktionsverfahren, Materialien und von Geschäftsmodellinnovationen abschätzen zu können. Am Lehrstuhl wurde daher die Kostenwirkungsgradrech-

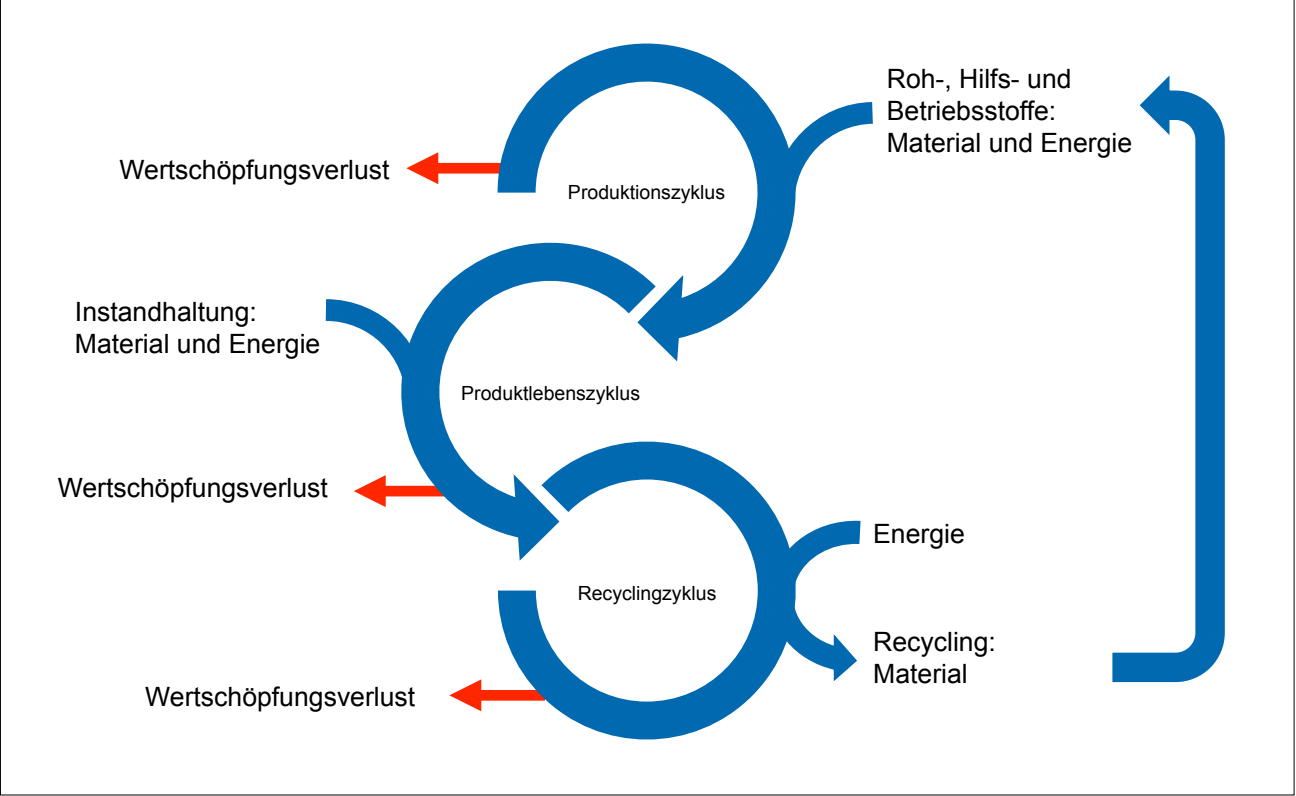


Bild 2: Stoffstromzyklen in verschiedenen Produktlebensphasen.

nung entwickelt, mit deren Hilfe Wertschöpfungsverluste von Produkten und Produktionssystemen gemessen werden können. Wie funktioniert das? Der Kostenwirkungsgrad liefert substanzielle Aussagen über die anbieterseitigen Kompetenzen und die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von Technologien, Prozessen, Stoffströmen, Innovationen und Wertschöpfungsketten. Zur Abschätzung von Verbesserungs- und Erfolgspotenzialen werden die Idealkosten eines Referenzobjekts – zum Beispiel eines Prozesses – zu den tatsächlich anfallenden Kosten in Beziehung gesetzt. Aktuelle Anwendungen der Kostenwirkungsgradrechnung erfolgen in der Automobilindustrie, bei der Bewertung von Produktinnovationen sowie im Stoff- und Energiestrommanagement. Übliche Kostenwirkungsgrade von Produktionssystemen in der Automobilindustrie oder im Maschinenbau liegen – bei reiner Fokussierung auf die wertschöpfenden Teile der Organisation – zwischen 0,2 und 0,65. Dies bedeutet, dass zwischen 35 und 80 Prozent der Kosten in produktiven Systemen nach wie vor auf Wertschöpfungsverluste entfallen. Selbst in der Großserienfertigung liegen damit erhebliche Wertsteigerungspotenziale vor, die in Unternehmen selten zielführend bewertet werden. Bei der Anwendung der Kostenwirkungsgradrechnung auf das Stoffstrommanagement sind zunächst die mengenmäßigen

Stoffströme und sodann die damit einhergehenden Wertschöpfungsverluste zu quantifizieren. Wertschöpfungsverluste können in jeder Phase des Produktlebens anfallen: Im Produktionsprozess können verunreinigte beziehungsweise nicht qualitätsgerechte Materialien Qualitätsprobleme verursachen, die sich in Nacharbeit und Ausschussproduktion widerspiegeln. In diesen Fällen reicht es keineswegs aus, nur die Kosten der Materialien zu erfassen. Vielmehr müssen auch Kosten nicht genutzter Maschinenzeiten oder von Nacharbeit sowie der Entsorgung beziehungsweise des Recyclings mit einbezogen werden. Noch nicht eingerechnet sind dabei Kosten, die durch zusätzliche Logistikdienstleistungen, das Handling der Materialien und den administrativen Aufwand – zum Beispiel das Führen von Entsorgungsnachweisen – entstehen. Betrachtet man qualitätsbedingte Wertschöpfungsverluste von Stoffströmen in der Produktion, so legen die Erhebungen nahe, dass die materialbedingten Kosten schnell bei dem Vierfachen und mehr des Einkaufspreises der Materialien liegen können. Die im Produktionssystem entstehenden zusätzlichen Kosten liegen fast immer deutlich über dem Zehnfachen der Entsorgungskosten, wenn man materialbedingte Wertschöpfungsverluste auf anfallende Entsorgungskosten bezieht. Da

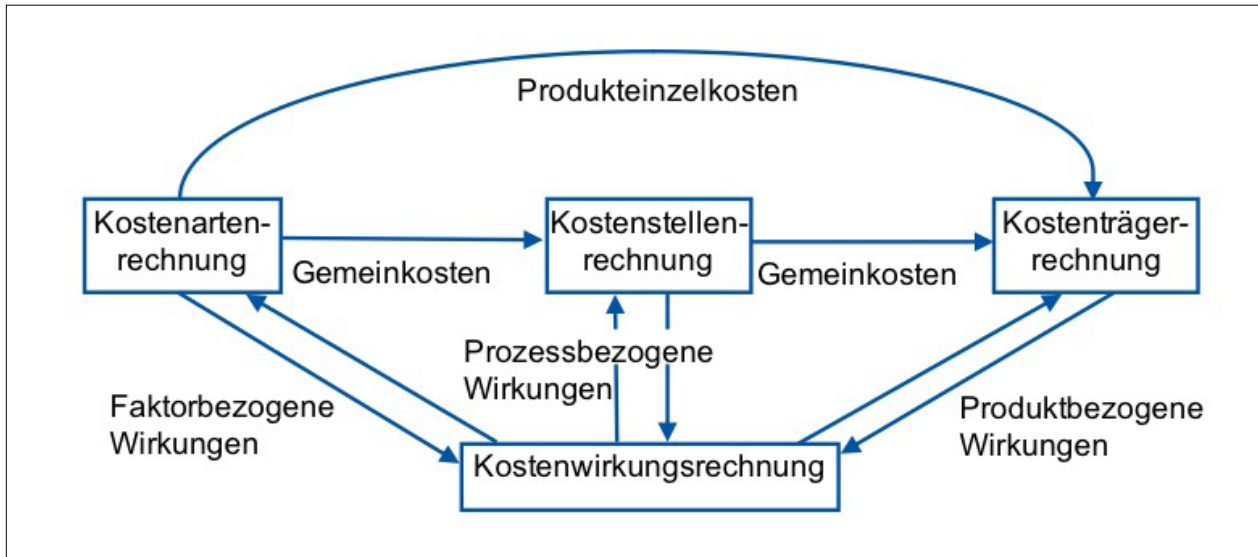


Bild 3: Berücksichtigung faktor-, prozess- und produktbezogener Kostenwirkungen im Controlling.

solche Kosten im Rahmen des Unternehmenscontrollings kaum verursachungsgerecht zugerechnet werden, entstehen in Unternehmen durch oft nicht sachgerechte Beschaffungsentscheidungen hohe Folgekosten. Hinzu kommt, dass gerade beim innerbetrieblichen Recycling Wertschöpfungsprozesse zyklisch durchlaufen werden und die damit einhergehenden Qualitätsprobleme gleich mehrfach auftreten können.

Ein weiteres Beispiel für zyklische Kostenbeziehungen sind Produktrückläufe, bei denen der Kunde ein Produkt aufgrund von Qualitätsmängeln oder am Ende der Produktlebensdauer an den Hersteller zurückgibt. Die Produktrücknahme ist in der Europäischen Union für zahlreiche Produktkategorien, zum Beispiel für Elektroaltgeräte, rechtlich verpflichtend. Infolge gestiegener Ressourcenpreise ist die Produktrückführung zum Hersteller in vielen Fällen aber auch wirtschaftlich interessant.

Relevante Kosten entstehen durch die Ausgestaltung der Sammelsysteme, die Rückführungslogistik, die Demontage sowie die Materialtrennung und -aufbereitung. Kritische Parameter für die wirtschaftliche Beurteilung der Produktrücknahme sind die zurückgeführten Produktmengen und die Qualität der Produkte. Insbesondere Verunreinigungen, unsachgemäßer Gebrauch, der Austausch von Produktbestandteilen und Materialien können zu überhöhten Kosten führen. Auch das Produktdesign hat erheblichen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit und die dabei anfallenden Kosten. Anzustreben ist daher eine Optimierung von Stoffströmen über den gesamten Produktlebenszyklus – von der Produktentwicklung bis zur Produktrücknahme beziehungsweise -entsorgung.

me beziehungsweise -entsorgung.

Viele Unternehmen haben Schwierigkeiten, die Kostenwirkungen der beschriebenen zyklischen Stoffströme realistisch abzuschätzen. Dies liegt daran, dass das klassische Controlling Ressourcenströme und die damit einhergehenden Kosten über die Kostenarten-, Kostenstellen-, und Kostenträgerrechnung immer vom Input zum Produktoutput verrechnet. Faktor-, prozess- und produktbezogene Kostenwirkungen, bei denen eine Rückwärtsverrechnung von Kosten erforderlich wäre, werden zumeist als Gemeinkosten über allgemeine Kostenschlüssel verteilt. Dadurch kommt es nicht nur zu einem ungenauen Kostenausweis, sondern auch zu Anreizdefekten, da der wirtschaftliche Erfolg von Verbesserungsmaßnahmen nur zum Teil den relevanten Akteuren im Unternehmen zugerechnet wird.

Die Kostenwirkungsgradrechnung kann gerade hier als zusätzliches Glied in der Kostenverrechnung dazu beitragen, auch rückwärts gerichtete Kostenströme zu erfassen und auf die verursachenden Stoffströme, Prozesse und Produkte zu verrechnen. Sie schafft damit die erforderliche Flexibilität, um zyklische Kostenbeziehungen und deren Verursacher – Faktoren, Prozesse, Produkte – sinnvoll verrechnen zu können.

Das Verständnis zyklischer Stoffströme ist aber nicht nur aus der Kostenperspektive des Produktherstellers interessant. Gerade die Kenntnis über Defizite in der Wertschöpfungskette kann dazu beitragen, Innovationspotenziale zu identifizieren und neue Geschäftsmodelle zu entwickeln. Hier spielen nutzerseitige Kostenwirkungen eine entscheidende Rolle. So fallen für die Beschaffung,

Bild 4: Additive passen Materialeigenschaften individuell an – dies senkt den Ausschuss durch Qualitätsmängel.  
Foto: Martin Braun



die Nutzung und die Entsorgung beziehungsweise das Recycling für den Produktnutzer erhebliche Kosten an. Diese lassen sich durch eine Optimierung von Sammel-, Rückführ- und Verwertungssystemen entscheidend verringern.

Auch der Austausch bisheriger Einsatzmaterialien kann nicht nur die Kosten am Ende des Produktlebens verringern, sondern sich auch auf die Wertschöpfung und Gebrauchsphase auswirken. Einerseits ist es möglich, dass die Herstellungskosten sowie die laufenden Kosten der Produktnutzung (zum Beispiel Wartung und Instandhaltung, Energieverbrauch, Qualitätskosten) gesenkt werden können. Andererseits kann auch der Produktnutzen gesteigert werden, zum Beispiel durch Verbesserungen bei der Leistungsfähigkeit sowie durch eine höhere Lebensdauer.

Insgesamt werden damit zwei wesentliche Komponenten von Geschäftsmodellen berührt: das Wertschöpfungs- und das Nutzenmodell. Dadurch ergeben sich für den Hersteller insbesondere dann Potenziale bei der Bepreisung von Produkten, wenn innovative neue Produkte (zum Beispiel Verbundwerk-

stoffe im Baubereich) angeboten werden, die keinem intensiven Wettbewerb ausgesetzt sind. Innovationen im stofflichen Bereich beziehungsweise in der stofflichen Wertschöpfungskette sind dann für den Markterfolg relevante Werttreiber – sowohl für den Anbieter als auch für den Nutzer.

Zusammenfassend kann die Berücksichtigung von zyklischen Kostenbeziehungen Wertschöpfungsketten nicht nur wirtschaftlich erfolgreicher machen, sondern auch einen erheblichen Beitrag zu Umweltschonung, Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung leisten. Dafür benötigen Unternehmen methodische Erweiterungen ihres Controllings. Dies gilt für Innovations-, Wertschöpfungs-, Rücknahme- und Recyclingprozesse gleichermaßen. Wenn es gelingt, diese Bereiche besser aufeinander abzustimmen, kann der wirtschaftliche Erfolg bestehender und innovativer Geschäftsmodelle erheblich gesteigert werden. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Wirtschaftswissenschaftlern an der RWTH stellt dafür eine wichtige Voraussetzung dar.

---

## Autoren

Univ.-Prof. Dr.rer.pol. Peter Letmathe ist Inhaber des Lehrstuhls für Controlling. Dipl.-Betriebsw. Marcel Höhn, M.Sc., und Ilja Rabinovitch, M.Sc., sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Controlling.

---

# Wie Grün sind unsere Metalle?

## Analyse der Umweltwirkungen entlang von Wertschöpfungsketten

Processes within supply chain networks account for approximately 40 % of global greenhouse gas emissions. At the same time the production of metals comes with the significant mining of resources. From the viewpoint of customers and society the responsibility to reduce emissions lies with companies using metals for the manufacturing of products. Up to date companies mainly focus on the reduction of emissions caused inside their own facilities or by the energy purchased from energy suppliers (scope 1 and 2 emissions). Usually, significantly higher potential lies in the reduction of emission along the supply chain (scope 3). However, quantifying emissions along the supply chain of complex products is a challenging task.

As a result, companies tend to evaluate ecological parameters based on average or global data, especially since country or even site specific data is often missing. Within this

article we demonstrate how this lack of data can be closed. To do so, it is necessary to analyze complex production and transportation processes and to quantify all involved in- and output flows of each production step while considering regional differences of technologies. This requires the analysis of complex supply chain networks and of global flows from raw materials to finished metal products procured by companies to be used within their own manufacturing processes. Results for steel and aluminum production show a huge impact of regionalized data on overall ecological footprint of finished products. These results may be used by companies to design their supply chains in a more eco-friendly manner or even by politicians to evaluate possible consequences of regulations on the metal producing industry which participates in a global market.

Prozesse in Wertschöpfungsnetzwerken verursachen etwa 40 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen und tragen wesentlich zum Ressourcenabbau sowie zu weiteren Umweltwirkungen bei. Kunden und Gesellschaft fordern daher zunehmend, dass Unternehmen die Verantwortung für die eigene Lieferkette übernehmen und Umweltwirkungen weitgehend reduzieren. Bisher haben sich viele Konsumgüterproduzenten und Markenhersteller, das heißt für Endkunden sichtbare Unternehmen am Ende der Wertschöpfungskette, auf die Umsetzung von Minderungsmaßnahmen in den eigenen Standorten und Prozessen konzentriert. Dabei wurden entweder die direkten Emissionen der eigenen Prozesse, so genannte Scope1-Emissionen, verringert oder es wurde der Energieverbrauch gesenkt beziehungsweise „Ökostrom“ eingekauft, um die aus der Energieerzeugung resultierenden Emissionen, die Scope2-Emissionen, zu senken. Auch die derzeit von vielen Unternehmen propagierten Minderungsziele – manche versprechen, den Kohlendioxidausstoß um 20 Prozent bis 2020 zu verringern – werden zumeist nur für das eigene Unternehmen formuliert. Emissionen entlang der Lieferkette, zum Beispiel für Rohstoffe und Vorprodukte, die außerhalb des direkten Einflussbereichs eines Unternehmens liegen, die Scope3-Emissionen, finden in der Praxis kaum Berücksichtigung. So zeigen Untersuchungen, dass nur vier Prozent der Unternehmen diese Emissionen überhaupt quantifizieren und die wesentlichen Verursacher identifizieren können. Dies ist bedauerlich, liegt hier für viele Branchen doch das größte Potenzial für Verbesserun-

gen. So werden in der Automobilindustrie 87 Prozent aller Emissionen außerhalb des direkten Einflussbereichs des Automobilherstellers in Form von Scope3-Emissionen verursacht. In anderen Branchen – Basiskonsumgüter 81 Prozent, Informationstechnologie 78 Prozent, Finanzwesen 86 Prozent – sieht es ähnlich aus siehe Bild 1.

Dies zeigt: Die Beschäftigung mit der Lieferkette und den Scope3-Emissionen ist von großer Bedeutung. Allerdings bestehen hierbei viele Herausforderungen. So umfasst ein Wertschöpfungsnetzwerk für komplexe Produkte, wie zum Beispiel Fahrzeuge, eine Vielzahl an Stufen mit vielen, global verteilten Standorten und mehreren zehntausend Zulieferern. In einem ersten Schritt bedarf es daher der Schaffung von Transparenz bezüglich des Wertschöpfungsnetzwerks als Voraussetzung für Verbesserungen. Diese Transparenz wird durch die Analyse und Bewertung aller Stoffströme entlang der Wertschöpfungskette geschaffen. Hierfür wird das Instrument der Ökobilanzierung verwendet. Allerdings wird im Rahmen von Ökobilanzen bisher vor allem mit Durchschnittswerten gerechnet. Für den Einsatz von Stahl oder Aluminium bedeutet dies, dass eine gemittelte

globale Verteilung zwischen der Primärproduktion (das heißt der Herstellung von Roheisen und Stahl aus gewonnenem Eisenerz), und der Sekundärproduktion (das heißt der Herstellung von Roheisen und Stahl aus im Kreislauf geführten Stahlschrotten), angenommen, der globale Energiemix angesetzt oder ein durchschnittlicher Prozesspfad gewählt wird.

Eine solche Vereinfachung ist eigentlich nicht

zulässig, da die mit der Produktion von Rohstoffen wie Stahl oder Aluminium verbundenen Umweltbelastungen erheblich vom Produktionsstandort und den damit verbundenen regionalen Faktoren wie Energiemix, Wirkungsgrad, Stand der Technik, der Produktionstechnologie beziehungsweise den gewählten Prozesspfaden sowie dem spezifischen Anteil der Primär- (Gewinnung aus Erzen) und Sekundärroute (Verwendung

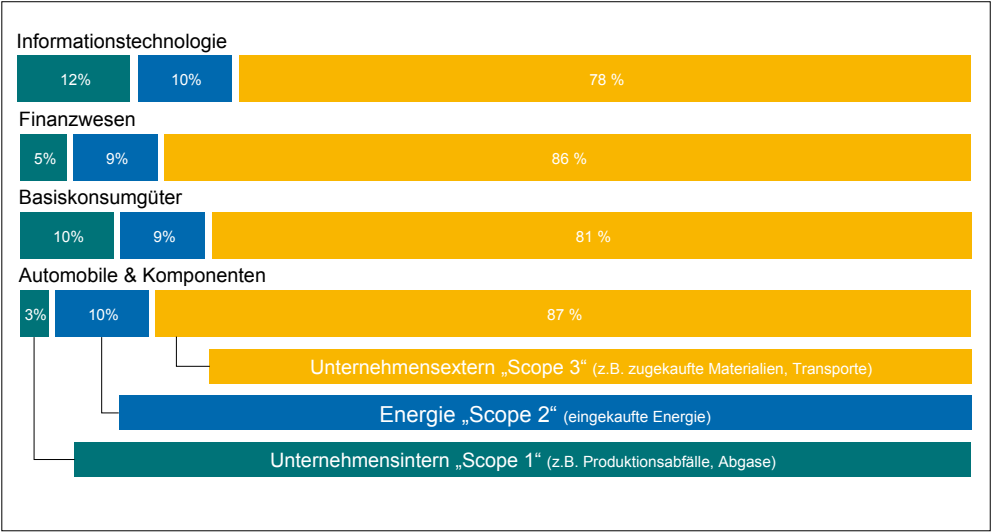


Bild 1: Verteilung der Treibhausgasemissionen zwischen Scope1, 2 und 3 verschiedener Branchen [Systain 2014].

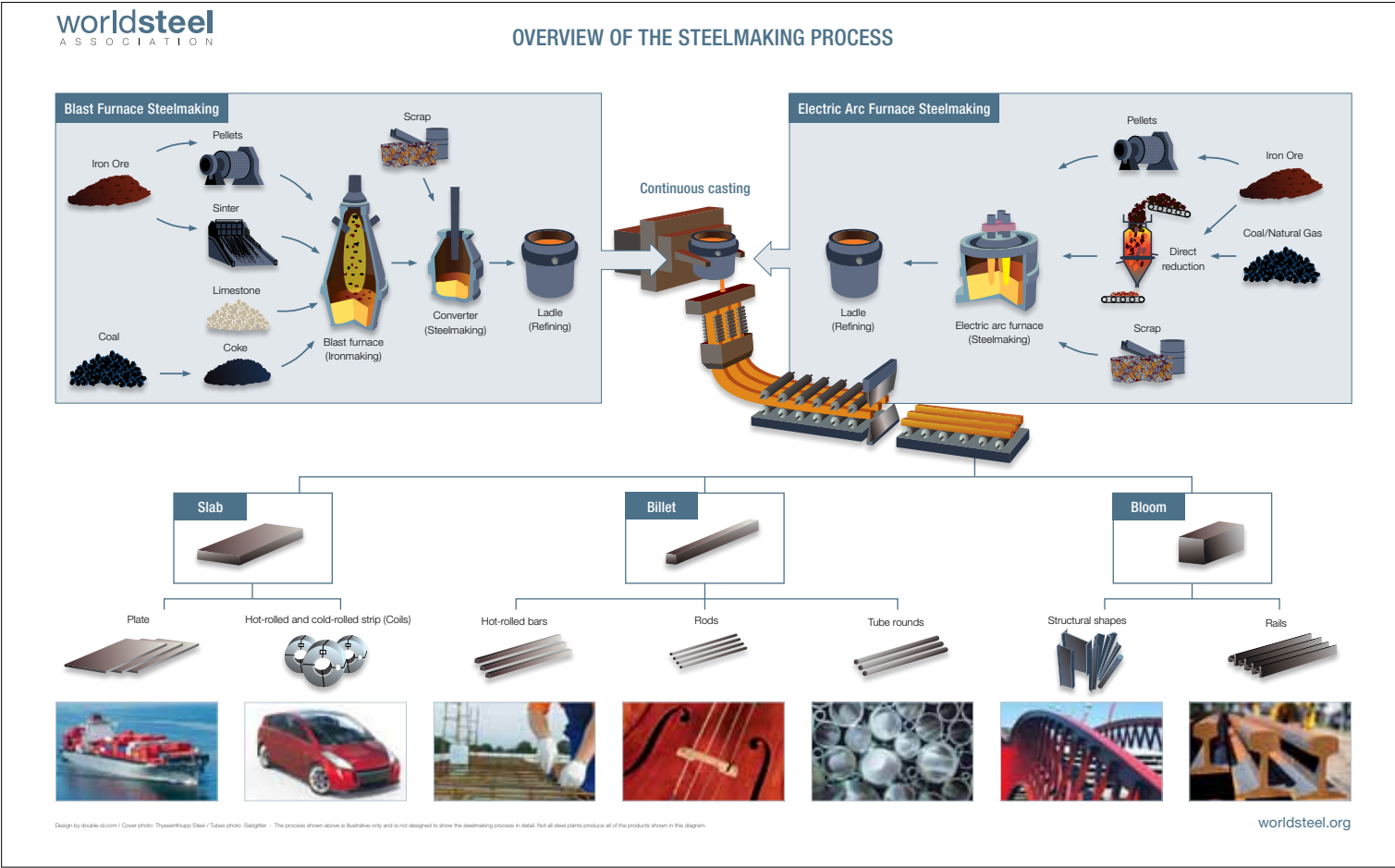


Bild 2: Produktionspfade der Stahlindustrie [Worldsteel Association 2013].

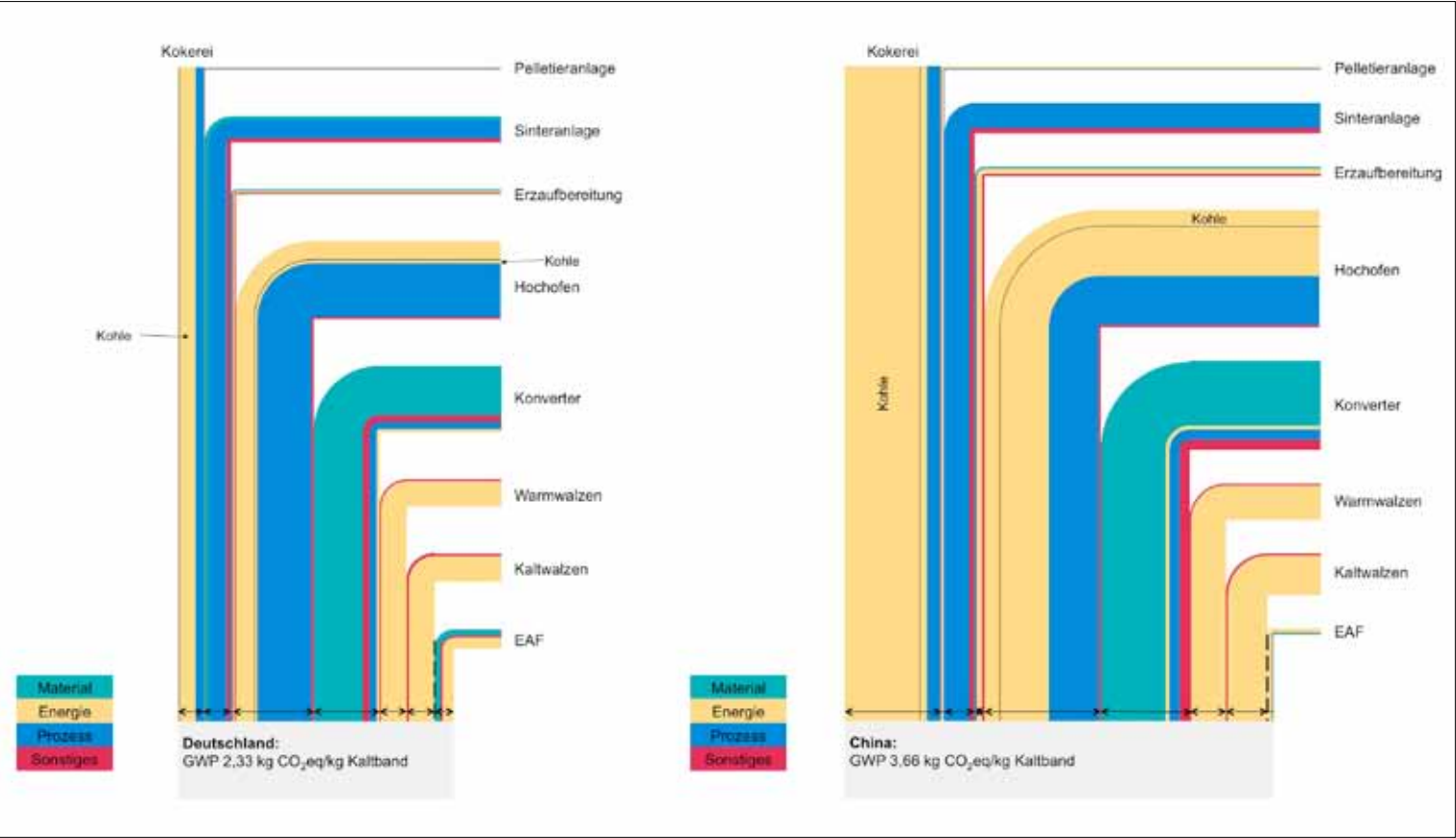


Bild 3: Sankey-Diagramme zur Entstehung von Treibhausgasemissionen über die Prozessstufen der primären und sekundären Stahlerzeugung bis zum Kaltband (Coil). Es verdeutlicht, welche Unterschiede sich für das Treibhausgaspotenzial bei der Produktion von einem Kilogramm Stahl in China und Deutschland aus importierten Erzkonzentraten ergeben.

von Recyclingmaterial) abhängen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich der Lehrstuhl für Operations Management mit der Analyse komplexer Wertschöpfungsnetzwerke für ausgewählte Rohstoffe, um Umweltwirkungen in Lieferketten hinreichend genau zu bewerten und globale Stoffströme verschiedener Branchen zu modellieren. Ziel ist die Unterstützung einer umweltorientierten Gestaltung von Wertschöpfungsnetzwerken. Hierbei bestehen enge Kooperationen mit der Industrie, beispielsweise dem Ford Forschungszentrum. Zur Umsetzung sind zahlreiche Analysen notwendig. Zunächst sind alle Produktions- und Transportprozesse zu erfassen. Für das Beispiel Stahl bedeutet dies, dass alle Aufbereitungs- und Logistikprozesse von der Erzgewinnung bis zur Erzeugung der Vorprodukte ermittelt und spezifiziert werden. Dabei stellt die Erfassung der potenziellen Produktionsstandorte jedes Prozessschrittes mit den jeweiligen regionalen und prozessspezifischen Charakteristika eine besondere Herausforderung dar. So existieren für die Produktionspfade von Stahl mehr als 36 Anlagentypen mit insgesamt mehr als 12.300 Anlagen weltweit. Hierbei sind die Standorte

der Anlagen auf einer geeigneten Aggregationssebene hinsichtlich Regionen oder Länder zu erfassen. Das ist die Basis für die Dokumentation aller In- und Outputs der Prozesse entlang der Wertschöpfungskette in Abhängigkeit der jeweiligen regionalen Faktoren. Sie ist die Grundlage für die ökologische Bewertung. Dabei finden auch technologische Unterschiede Berücksichtigung, wie beispielsweise ein höherer Energieverlust durch kleinere Bauweisen von Anlagen, die Nutzung möglicher Energieträger, die Verwendung unterschiedlicher Transportmittel oder der Einsatz verschiedener Inputmaterialien. Eine derartige Differenzierung ist mit bestehenden Ökobilanzdatenbanken bisher nicht möglich. Vielmehr werden hauptsächlich zusammengefasste Datensätze zur Verfügung gestellt, die oft intransparente Dokumentationen aufweisen und höchstens eine auf wenige Parameter begrenzte Spezifizierung zulassen. Erst nach Ermittlung der tatsächlichen Lieferkette eines Stahlproduktes kann eine ökologische Bewertung erfolgen. Es entstehen so sogenannte Sankey-Diagramme. Sie schlüsseln, einzeln betrachtet, auf, wo entlang der Wertschöpfungsketten der

Großteil der Emissionen entsteht und wie sich diese aus verwendeten Materialien, Energiezufuhr, Prozessemissionen und weiteren Faktoren zusammensetzen. Aus Sankey-Diagrammen können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. So sind die Transportprozesse in Bild 3 unter „Sonstiges“ aufgeführt, da diese in Relation zur Gesamtwirkung unbedeutend sind. Dies ist auf den ersten Blick nicht offensichtlich, da sehr große Massen an Erzen und Kohle über die Weltmeere verschifft werden. Ebenso hat die Gewinnung des Eisenerzes sowie dessen Aufbereitung nur einen relativ geringen Einfluss. Sichtbar wird, dass die Emissionen, die während der Prozesse und Energieerzeugung anfallen, entscheidend sind. Betrachtet man die Diagramme im Vergleich, wird deutlich, dass insbesondere technologische Unterschiede, ein nachteiliger weil emissionsintensiver Energiemix sowie ein hoher Anteil der Primärroute an der Stahlerzeugung zu deutlich höheren spezifischen Emissionen in China im Vergleich zur Produktion in Deutschland beitragen. So setzen chinesische Hochofen mehr Kohle und Koks ein, da aufgrund der Bauweise höhere Wärmeverluste auftreten und teilweise Erze mit geringerem

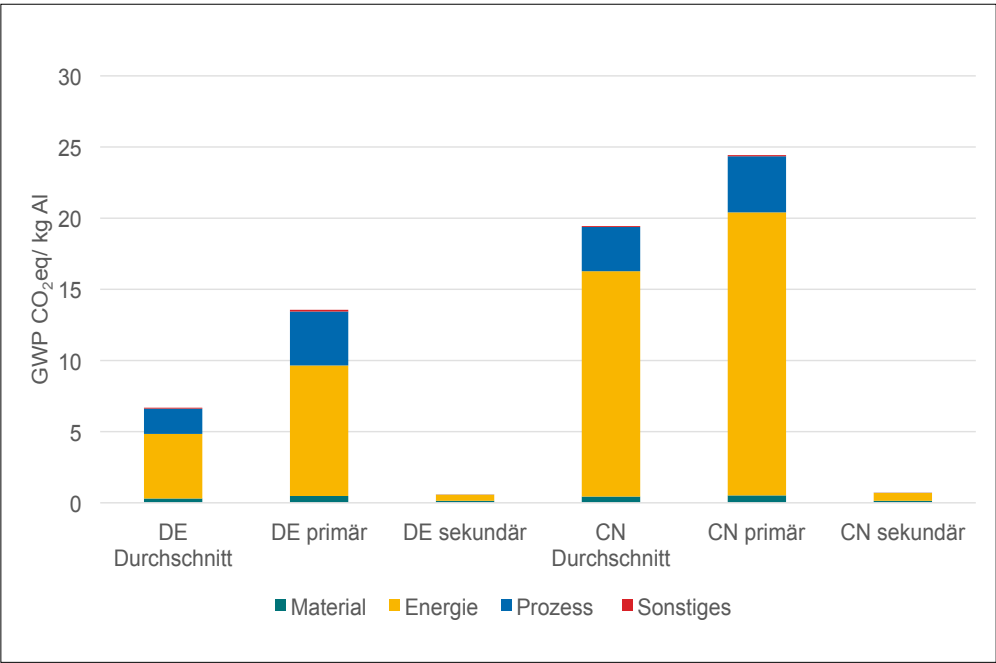


Bild 4: Treibhausgaspotenzial der Aluminiumproduktion im Vergleich zwischen China und Deutschland. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit wurde auf äquivalente Mengen bei gleichem Eisengehalt skaliert.

Eisengehalt aus inländischer Gewinnung eingesetzt werden. Zudem weist der chinesische Strommix einen sehr hohen Anteil an Energieerzeugung aus Kohle auf. Als weiteres Wertschöpfungsnetzwerk wurde die Aluminiumproduktion mit regionalen Spezifika untersucht. Erneut tragen im Wesentlichen die Prozessemissionen und die Emissionen aus der Energieerzeugung zum Treibhausgaspotenzial bei. Auch hier birgt die sekundäre Produktion deutliche ökologische Vorteile. Der durchschnittliche Ausstoß für ein Kilogramm Aluminium in China ist im Vergleich zu Deutschland daher auch bedeutend höher, da der Anteil der Sekundärproduktion in China bei nur 21 Prozent liegt, während er in Deutschland etwa 53 Prozent beträgt. Doch auch wenn der Anteil der beiden Routen als gleich angenommen wird, sind die Emissionen in China höher. Dies ist vor allem auf die hohen Emissionen für die Energieerzeugung während der Primärproduktion zurückzuführen. Wie bei der Stahlproduktion haben auch bei Aluminium der Abbau von Bauxit sowie die Transportprozesse keinen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkung Treibhauseffekt. Insgesamt erhöhen derartige regionalspezifische

Analysen die Transparenz über Umweltwirkungen in Wertschöpfungsnetzwerken deutlich. Große Potenziale zur Reduktion globaler Treibhausgasemissionen sind erkennbar. Diese Potenziale der vorhandenen Kapazitäten können effektiv genutzt werden – dies gilt insbesondere, da sowohl die Stahls als auch die Aluminiumindustrie hohe globale Überkapazitäten aufweisen. Die Erkenntnisse lassen sich zum einen von Unternehmen nutzen. Eine aktive Gestaltung von Wertschöpfungsketten kann die ökologische Nachhaltigkeit von Produkten – beispielsweise besteht ein Fahrzeug zu etwa 40 Prozent aus Stahl – signifikant verbessern. In Zusammenarbeit mit dem Ford Forschungszentrum arbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Lehrstuhls für Operations Management daran, Ökobilanzen von Fahrzeugen durch die dargestellten regionalspezifischen Analysen zu verbessern. Mittels der Analysen gelingt es, die globalen Durchschnittswerte durch (regional-)spezifische Daten zu ersetzen, um die aus einer aktiven umweltorientierten Gestaltung von Wertschöpfungsketten resultierenden ökologischen Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Zum anderen kann diese Art der Entschei-

dungsunterstützung im Rahmen politischer Entscheidungsprozesse genutzt werden. Führt die Belastung europäischer Metallproduzenten durch ein auf Europa beschränktes Emissionshandelssystem beispielsweise zum Abbau europäischer Kapazitäten oder zur Verlagerung der Stahl- und Aluminiumproduktion nach Asien, resultieren daraus aus globaler Perspektive deutlich höhere Emissionen, da die Produkte aus China mit einem deutlichen höheren Treibhauspotenzial belastet sind. Mittels der dargestellten regionalspezifischen Analysen können diese Auswirkungen quantifiziert werden und somit bereits im Rahmen der Regulierungsgestaltung Berücksichtigung finden.

**Autoren**  
Univ.-Prof. Dr.rer.pol. Grit Walther ist Inhaberin des Lehrstuhls für Operations Management. Veronika Liebke, M.Sc. Wirt.-Ing., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Operations Management.

# Ewige Verantwortung für Abfälle?

## Wann endet die abfallrechtliche Entsorgungspflicht?

An eternal responsibility for waste? A producer or an owner of waste can be approached only if he or she is considered responsible at the moment in question. So first of all the question is whether these materials are still categorized as waste. Otherwise there have to be objective criteria which show the intention of the owner not to dispose these materials but to reintroduce them into the recycling management. Furthermore, the European Court of Justice pointed out that the materials actually have to be brought to an economic purpose beyond waste disposal.

Seit „Brady“ ist klar: Ein Erzeuger beziehungsweise Besitzer von Abfällen kann nur in Anspruch genommen werden, wenn er zu diesem Zeitpunkt noch als Verantwortlicher angesehen werden kann. Dies betonte der Europäische Gerichtshof (EuGH) im Oktober 2013 im Urteil „Brady“. Im Verfahren ging es um die Frage, unter welchen Voraussetzungen Gülle aus einem Schweinemastbetrieb mit über 2.000 Tieren als Nebenprodukt und nicht als Abfall eingestuft werden kann, und welches Maß an Gewissheit hinsichtlich der beabsichtigten Wiederverwendung der Gülle erforderlich ist. Einige Bedingungen müssen dafür aber erfüllt sein.

So ist zum Beispiel „vorab ... festzustellen“, ob die in Rede stehenden Stoffe noch als Abfall einzustufen sind. Es kann also Beweisprobleme für den Abfallverursacher geben. Aber die nationalen Beweislastregeln dürfen nicht zu einer übermäßigen Erschwerung des Nachweises führen, der vom Ansatz her dem Besitzer der fraglichen Stoffe obliegt. Anhand von objektiven Kriterien muss der Abfallbesitzer seine Zielrichtung belegen können, Stoffe nicht entsorgen, sondern sie wieder in den Wirtschaftskreislauf bringen zu wollen. „Phantasieprodukte“ kommen dafür nicht in Betracht, ebenso wenig unübliche Verwendungszwecke. Der EuGH hebt vor allem darauf ab, dass die Stoffe nach den

zu erbringenden Garantien des Besitzers gekennzeichnet und tatsächlich einem wirtschaftlichen Zweck außerhalb der Abfallentsorgung zugeführt werden.

Nach Paragraph 5 Kreislaufwirtschaftsgesetz, kurz KrWG, endet die Abfalleigenschaft und damit auch die Pflichtenstellung für die Abfallentsorgung, wenn der Entsorgungsvorgang beendet ist. Ein solcher Fall ist etwa dann gegeben, wenn Bauabfälle wieder im Straßenbau eingesetzt worden sind, ohne dass sich daraus schädliche Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt ergaben, siehe Paragraph 5 Abs. 1 Nr. 4 KrWG. Dann wurden ihre stofflichen Eigenschaften genutzt, wenn sie für eine Stabilisierung des Untergrundes sorgen sollten, und zwar für einen anderen Zweck entsprechend Paragraph 3 Abs. 25 Fall 2 KrWG. Nicht allein der Zustand, sondern die erneute Verwendung ist hierbei ausschlaggebend, denn durch das Material lässt sich nicht ausschließen, dass es eine schädliche Auswirkung auf Mensch oder Umwelt geben kann.

Möglich ist aber auch eine Umformung der Bauabfälle zu einem neuen Produkt, das die technischen Anforderungen, Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen erfüllt. Auch dann endet die Abfalleigenschaft nach Paragraph 5 KrWG. Zudem muss ein Markt dafür bestehen und es darf sich ebenfalls nicht

negativ auf Mensch oder Umwelt auswirken. Sie müssen noch nicht tatsächlich eingesetzt worden sein, sondern nur das dahin führende Recycling durchlaufen haben.

### Abtreten der Verantwortung

Die Pflichtenstellung eines Verantwortlichen kann auch dann entfallen, wenn die eines neuen begründet wird. Zwar widerspricht dies generell der Konzeption des Paragraphen 3 Abs. 8 KrWG, wonach auch mehrere Abfallerzeuger nebeneinander verantwortlich sein können. Jeder Abfallerzeuger bleibt hier für das Gefahrenpotenzial verantwortlich, das er durch den von ihm verursachten Abfall beziehungsweise dessen Behandlung hervorgerufen hat. Der Erzeuger ist daher auch noch nach Verlust der tatsächlichen Sachherrschaft verantwortlich. Auch der Abfallbesitzer muss sich über den weiteren Entsorgungsweg informieren und soll selbst mit Weitergabe an einen zertifizierten Entsorgungsbetrieb verantwortlich bleiben, auch wenn eine Vermischung mit anderen Abfällen eingetreten ist.

Allerdings hat der Europäische Gerichtshof im Urteil „Brady“ einem Abfallbesitzer erlaubt, die Abfälle und die Verantwortung dafür durch Übergabe an eine Person weiterzuleiten, die über eine Genehmigung nach Artikel 23 Abfallrahmenrichtlinie, kurz AbfRRL, verfügt oder nach Artikel 24 AbfRRL von einer Genehmigungspflicht befreit ist. Er musste gerade nicht die Bedingung erfüllen, dass der neue Abfallbesitzer die einschlägigen Vorschriften einhält. Eine solche Bedingung würde vielmehr dem Gesamtsystem der Artikel 8, 10 und 11 AbfRRL widersprechen. Danach ist ausschließlich das Unternehmen verantwortlich, das die Abfälle für die Entsorgung übernommen hat. So kann sich der Gebäudeeigentümer, aber auch der Abrissunternehmer seiner abfallrechtlichen Verantwortlichkeit durch Übergabe an Anlagen oder Unternehmen entledigen, die die in Anhang II A oder II B genannten Maßnahmen durchführen. Das sind namentlich zertifizierte Verwertungsbetriebe etwa zur Aufbereitung von Bauschutt. Insoweit ist Paragraph 22 S. 2 KrWG einschränkend auszulegen, der die Übertragung der Verantwortlichkeit auch bei der Beauftragung Dritter gerade ausschließt. Indes setzt sich das Unionsrecht durch. Auch bei der Abgabe von Bauabfällen an Deponien kann sich der Anlieferer daher darauf verlassen, dass diese ordnungsgemäß entsorgt werden. Er muss nicht etwa für Nachsorgekosten der Deponie aufkommen.

Anders sieht es aus, wenn die Person, die den Abfall übernommen hat, über keine Genehmigung nach Artikel 23 AbfRRL verfügt, noch von deren Notwendigkeit nach Art. 24, 26 AbfRRL befreit und gemeldet ist. Dann bleibt die Verantwortlichkeit beim Verursacher des Mülls. Insbesondere kann nicht der Abrissunternehmer als Abfallerzeuger seine Verantwortlichkeit auf Subunternehmer verlagern, indem er diesen lediglich große Spielräume lässt. Die Subunternehmer müssen zudem die nach der AbfRRL geforderte Qualifikation haben. Der Gebäudeeigentümer ist hingegen bei Einschaltung eines Abrissunternehmers, dem er keine detaillierten Weisungen erteilt, von vornherein kein Abfallerzeuger oder -besitzer.

### Grundrechtliche Grenzen

Ohne eine Unterbrechung der abfallrechtlichen Verantwortung im letzten Fall würde auch der Grundsatz der notwendig persönlichen Zurechnung von Verantwortlichkeit durchbrochen. Dieser gilt insbesondere dann, wenn wegen abfallrechtlicher Verfehlungen ein Bußgeld oder gar eine Strafe droht. Damit greifen, wie Pedro Cruz Villalón, Generalanwalt beim Europäischen Gerichtshof, näher ausgeführt hat, die strafrechtsbezogenen Garantien der Europäische Grundrechtecharta, EGRC, in Bezug auf die Gesetzmäßigkeit und Verhältnismäßigkeit ein: Wie Artikel 49 EGRC zugrunde legt, besteht eine Verantwortlichkeit ausschließlich für die eigenen Handlungen beziehungsweise für Handlungen, für die man rechtlich einzustehen hat. Das ist nur für die Handlungen der eigenen Angestellten der Fall, nicht aber für Handlungen von Unternehmen, mit denen ausschließlich kommerzielle Beziehungen bestehen. Damit muss ein in der jeweiligen Person liegender Anknüpfungspunkt bestehen. Dieser kann hier nur darin gesehen werden, dass Abfälle an eine Person weitergegeben werden, die keine Genehmigung zu deren weiterer Behandlung hat und davon auch nicht befreit ist.

Bei einer solchen Konzeption wird auch das Eigentumsgrundrecht nicht unverhältnismäßig eingeschränkt, lassen sich doch anders von Abfällen ausgehende Gefährdungen für die Umwelt nicht wirksam verhindern. Hingegen würde das Eigentumsgrundrecht über Gebühr eingeschränkt, wenn praktisch jede Weitergabe von Abfällen die persönliche Verantwortlichkeit des Abfallbesitzers fortbestehen ließe. Eine solche Weitergabe würde dann praktisch zum unkalkulierbaren Risiko

und dadurch weitestgehend ausgeschlossen, eine weitere Nutzung der Abfälle de facto beschränkt. Die damit einhergehende wirtschaftliche Belastung bildet einen „unverhältnismäßigen, nicht tragbaren Eingriff(...)“. So wird der strafrechtliche Ansatz eigentumsgrundrechtlich unterlegt und damit ausgeweitet, so dass er auch für Verwaltungsanktionen gelten muss. Die Verantwortung für Abfälle ist nicht endlos, wenn dafür zertifizierte Unternehmen eingeschaltet werden. Das sei anhand von Bauabfällen näher erläutert: Der Gebäudeeigentümer braucht sich um die Entsorgung von Bauabfällen grundsätzlich nicht mehr zu kümmern, wenn er einen Abriss- oder Bauunternehmer eingeschaltet und diesem die Arbeiten vor Ort wie auch die Entsorgungswege überlassen hat, also ohne detaillierte Vorgaben zu machen. Der Abriss- oder Bauunternehmer wird durch seine konkrete Tätigkeit Abfallerzeuger. Er kann sich seinerseits der abfallrechtlichen Verantwortung entsprechend dem EuGH-Urteil „Brady“ über Paragraph 22 S. 2 KrWG hinaus dadurch entledigen, dass er genehmigte oder von einer Genehmigungspflicht befreite Unternehmen mit der Abfallentsorgung betraut – sei es auf einer Deponie, sei es im Rahmen von Verwertungsanlagen. Im letzten Fall endet die Abfalleigenschaft ohnehin, wenn Stoffe entstehen, welche die üblichen technischen Anforderungen erfüllen, oder aber Bauschutt direkt für den Straßenbau verwendet wurde, ohne Umwelt- oder Gesundheitsgefahren hervorzurufen. Hingegen begründet die Einschaltung von Subunternehmern, die nicht weitestgehend selbstständig agieren können, keine Abtretung der Verantwortung für den Abfall. Diese sind höchstens Abfallbesitzer. Diese Einstufung ändert aber nichts an der fortbestehenden abfallrechtlichen Verantwortung des Abriss- oder Bauunternehmers.

---

### Autor

Univ.-Prof. Dr. jur. Walter Frenz betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Berg-, Umwelt- und Europarecht.

---

# Education 4.0 in den Ingenieur- wissenschaften

## Herausforderungen und Potenziale

The 21st century is driven by the extension of industry 4.0 to a society 4.0. Some of the vital phrases revolve around smart cities and their grids, big and smart data, etc. The current developments within industry and the engineering sciences therefore pose major challenges for the education of engineering students in universities all over the world. Practical and immersed education of the growing body of engineering students has become a necessity due to the evolving requirements within the industry. Within this context, virtual learning environments arise, allowing a shift towards more interactive and collaborative e-learning methods. The benefits of those virtual worlds can be summarized in the possibility of hazard-free, explorative learning, visualization of invisible processes, the slow motion of fast processes as well as immersion in those worlds using natural user interfaces. Those environments bear a huge potential to support the student lifecycle with situated learning, problem based learning and immersion as key resources for high transfer achievements of developed knowledge and skills.

Along with these possibilities the term education 4.0 has been coined, which relies on the above technologies and takes them to a further level by aiming to make a basis for life-long learning platforms. All of that eventually creates new demands on the new generations, and therefore new job opportunities are created within a Job Market 4.0.

Mit der rasanten Entwicklung disruptiver Technologien durchlebt unsere Gesellschaft und Arbeitswelt in den letzten Jahren einen intensiven Veränderungsprozess, der auch die Möglichkeiten von und Anforderungen an Aus- und Weiterbildungen radikal verändert. Maßgeblicher Treiber ist die Digitalisierung, die unsere Arbeitsmodelle neu formt und dabei neue Kommunikations- und Kooperationsmodelle möglich und notwendig macht. Auf dem Weg zur intelligenten und flexiblen Produktion verschmelzen Informations- und Kommunikationstechnik und läuten die vierte industrielle Revolution ein.

Der Rohstoffsektor hat in den vergangenen Jahren bereits Umbrüche hin zu erneuerbaren Energien erfahren und steht unter starkem internationalem Wettbewerbsdruck. Durch neue intelligente und vernetzte Systeme wie das Internet der Dinge oder Cyber-Physical-Systems werden Produktionen, Fördertechniken und Logistikprozesse neu definiert. Gleichzeitig verändern sich auch die Mensch-Maschine-Interaktionen. Intelligente Wertschöpfungsketten entstehen, die den gesamten Produktlebenszyklus einschließen, von der Innovation bis hin zum Recycling. Kundenwünsche stehen im Vordergrund, „Losgröße 1“ könnte schon bald in vielen Bereichen der neue Standard werden: Hier trifft der technologische Trend einer flexibleren Automatisierung durch immer intelligentere Systeme auf das sich immer stärker artikulierende gesellschaftliche Bedürfnis der Individualisierung und Personalisierung von Produkten und Services. Durch die ganzheitliche Vernetzung der Produktion stehen Echtzeitdaten zur Verfügung, mit deren Hilfe

Unternehmen unmittelbar auf Rohstoffverfügbarkeiten reagieren und somit Energie- und Ressourcenplanung deutlich effizienter gestalten können.

Diese neuen Möglichkeiten durch die vernetzte und effizientere Produktion gehen mit neuen Anforderungen an die Mitarbeiter einher. Durch Antizipation entsprechender Veränderungen stellen sich Herausforderungen bereits in der Ausbildung qualifizierter Fachkräfte, was zur Diskussion des Themas Education 4.0 in den Ingenieurwissenschaften führt. Drängende Fragen, die sich in diesem Zusammenhang ergeben, sind: Wie werden wir in der Lehre auf die eingangs skizzierte Entwicklung reagieren? Wie gestalten wir eine Lehre für zukünftige Herausforderungen und Anforderungen? Insbesondere aufgrund der sich verändernden Realitäten in Unternehmen im Zuge von 4.0 sind neuartige Konzepte erforderlich, um Entwicklungen zu antizipieren. Schaffen wir es, in diesem Sinne mit agileren Lehrplänen und innovativen Konzepten im Sinne einer Education 4.0 moderne Managementmethoden und Entscheidungsprozesse frühzeitig zu vermitteln? Eine derartige Lehre bildet den Grundstein für eine Learning Society 4.0, in der neue Formen des Lehrens und Lernens etabliert werden, basierend auf Virtual- und Augmented Reality-Methoden und weiteren Lehrkonzepten der Zukunft.

Nicht nur die Art und Weise der Unternehmensführung verändert sich radikal. Das Arbeitsleben jedes Mitarbeiters steht vor massiven Umbrüchen: Neue Fertigkeiten und Verantwortlichkeiten werden unabdingbar und etablierte Tätigkeitsprofile reichen nicht

mehr aus, um den neuen Anforderungen begegnen zu können. Höhere IT-Kompetenzen gehen Hand in Hand mit agilen Führungs- und Prozessmodellen in Unternehmen, mit höherer Uncertainty der Arbeitskonditionen und -aufgaben sowie mit der Fähigkeit zur Kooperation in immer heterogeneren Teams. Diese sind im Übrigen zunehmend nicht mehr nur auf Menschen beschränkt, sondern lassen robotische Systeme und Web-Agenten mit großer Selbstverständlichkeit zu gleichberechtigten „Kollegen“ werden.

Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen muss insbesondere die Lehre im Bereich der Studierenden der Ingenieur- und Materialwissenschaften neu überdacht werden. Hand in Hand gehen daher die – ebenfalls 4.0-getriebene – Entwicklung neuer universitärer Lehr- und Lernformate von „Education 4.0“ mit den bereits in den letzten Jahren breit diskutierten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen einer „Society 4.0“. Insbesondere die technologische Entwicklung im Kontext „Industrie 4.0“ – und damit einhergehend den Cyber-Physical-Systems – führt zu der Etablierung von intelligenten Fabriken sowie neuen Arten der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung mit höchst individualisierten und quervernetzten Produktionen.

Mit der Verkürzung der Innovationszyklen verringert sich auch die Halbwertszeit des Wissens. Ausschließlich von dem in der Ausbildung Gelernten kann keinesfalls mehr über die gesamte Erwerbsbiografie profitiert werden. Life-Long-Learning wird und muss zunehmend zeitlich beschränkte Lernformate ablösen. Über die Schul- und Hochschulbildung hinaus wird die kontinuierliche (Weiter-)Qualifizierung Bestandteil der Unternehmen und sämtlicher Arbeitgeber jedweder Organisationform. On-the-job-Qualifizierungsmodelle müssen erarbeitet und neu definiert werden, was zu einer ganzheitlichen, neuen Definition des Kompetenzerwerbs führt: ein „Education 4.0“-Ansatz. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die tradierte Abfolge von Schule und Beruf zugunsten hochintelligenter lebenslanger Lernsituationen ändert. Dabei transformiert sich die Art und Weise der Wissensvermittlung. Und gleichermaßen bedarf es eines flexiblen, motivierten und IT-affinen „Nachwuchses“, der bereits früh mit der Digitalisierung konfrontiert wurde und deren Potenziale, Chancen und Vorteile zu nutzen weiß.

Das mündet auch in eine neue Form des „Entrepreneuriums“: Die letztjährigen Entwicklungen machen deutlich, dass Innovatio-

nen nicht mehr alleine durch einzelne Personen oder Unternehmen hervorgebracht werden, sondern zunehmend mehr in der „crowd“ entstehen. Hochagile Gruppenstrukturen zeichnen diese Herangehensweise aus. Partizipation durch Nutzer, Verbraucher, Produzenten und Konsumenten am gesamten Lebenszyklus eines Produktes steht im Vordergrund. Das trifft gleichermaßen auf Produkte des täglichen Bedarfs zu, wie auch auf die Rohstoffgewinnung und den Wechsel zu erneuerbaren, nachhaltigen Energien. Konzepte, die in diesem Kontext entstanden, sind beispielsweise „Customer Co-Creation“, „Open Innovation“, „Crowd Governance“, „Crowd Management“ und „Crowd Funding“. Allen gemein ist die IT-basierte Integration in den Innovationsprozess. Dabei weichen die Grenzen einzelner Unternehmen auf. Input und Know-how von außen wird zugekauft oder durch (Ideen-)Wettbewerbe geschickt integriert. Neue Geschäftsmodelle entstehen, neue Managementkonzepte, neue Qualifizierungskonzepte und Kompetenzmodelle werden notwendig. In diesem Kontext entwickeln sich neue Berufe und Ausbildungsprofile, wie zum Beispiel der Wissens- und Social-Media-Manager oder der Data Analyst.

Wichtige Trends in der Lehre liegen in der Erweiterung des Lernraums in die „Virtualität“: Massive Open Online Courses, kurz MOOCs, sind ebenso in diese Entwicklung zu fassen wie deren Grundbausteine – zum Beispiel inzwischen vielfältige eLearning-Angebote, moderne Entwicklungen hin zu Remote-Laboren oder virtuellen 3D-Welten. Die virtuelle Steuerung von Kohleförderbaggern, die Arbeiten am Schmelztiegel oder im pyrometallurgischen Labor erhalten Einzug in das Curriculum, was noch vor wenigen Jahren undenkbar gewesen wäre: Realsimulationen waren schlicht und ergreifend zu teuer, virtuell wird es bezahlbar. Zusätzlich stellen wir fest, dass die digitale Revolution bereits „ihre Kinder entlässt“: Die individualisierten Lernmodelle der „Digital Natives“ machen individualisierte Lehrkonzepte notwendig. Ein weiterer Trend entwickelt sich entlang der Big-Data-Ansätze: Durch die Virtualisierung der Lehre entstehen Unmengen an Daten entlang des individuellen Lernprozesses. Data Analytics, insbesondere Learning Analytics, hat zum Ziel, mit Hilfe KI-getriebener Big-Data-Verfahren eine solide Grundlage für bedarfsgerechte, individuelle Lernangebote zu schaffen und den Erfolg der Ausbildung exponentiell zu erhöhen. Individuelle Lernstandskontrollen und -analysen werden mög-

lich, indem Aktivitäten pro Tag sowie zeitliche Abfolgen, Muster und Lernpfade analysiert und aufgezeigt werden können. Im nächsten Schritt können dadurch Entwicklungen und potenzielle Probleme identifiziert und letztlich eine individuelle Lernstrategie durch „intelligente personalisierte Agenten“ realisiert werden. Über die bloße Optimierung der Lehr- und Ausbildung hinaus werden hierdurch Barrieren reduziert. „Individualisierte Bildung für alle“ wird von der Utopie zu einer realen Perspektive.

Abschließend gilt es festzuhalten, dass Lehren und Lernen für die Industrie der Zukunft neue Formen der Aus- und Weiterbildung notwendig macht. Besonders Qualifizierungskonzepte und -methoden müssen mit den technologischen Entwicklungen Schritt halten und bedarfs- sowie marktgerecht Mitarbeiter auf anstehende (technologische) Herausforderungen vorbereiten. Remote-Labs, MOOCs und blended learning sind nur einige der didaktischen Methoden, die insbesondere für die Ingenieurwissenschaften zunehmend an Bedeutung gewinnen und das klassische, curriculare Lehrangebot verdrängen. Learning Analytics werden eine zunehmend zentrale Rolle spielen, wenn es gilt zielgruppen- und bedarfsgerechte, individuelle Ausbildungskonzepte zu entwickeln. Deutschland muss im Sinne der Education 4.0 seine Lehrangebote an die Bedarfe der Lernenden und der Unternehmen anpassen, um eine wettbewerbsfähige Qualifizierung der Mitarbeiter für die nächsten Jahre sicherzustellen.

---

## Autoren

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Sabina Jeschke ist Inhaberin des Lehrstuhls für Informationsmanagement im Maschinenbau und Direktorin des Kybernetik-Clusters IMA/ZLW & IfU. Dr.phil. Anja Richert ist Juniorprofessorin für Agile Managementpraktiken in technologieorientierten Handlungssystemen und Geschäftsführerin des Zentrum für Lern- und Wissensmanagement (ZLW) des Kybernetik-Clusters IMA/ZLW & IfU. Stefan Schröder, M.Sc., ist Forschungsgruppenleiter „Innovations- und Zukunftsforschung“ des Kybernetik-Clusters IMA/ZLW & IfU, Mohammad Shehadeh, M.Sc, ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe.

---

# Den Rohstoff- und Recyclingsektor in Bewegung bringen

## Start-up-Förderung der RWTH Aachen

The raw materials and recycling sector is often described as static and short on innovation. Entrepreneurship and the creation of start-ups could provide a solution to unlock the sector's innovation potential. However, the sector poses specific challenges to the growth of start-ups. RWTH Aachen University has recognized this and supports start-ups through its successful Technology Transfer and Entrepreneurship Center and through the EU innovation cluster EIT Raw Materials.

Der Rohstoff- und Recyclingsektor ist in weiten Teilen statisch. Kritiker bezeichnen ihn als eingestaubt, Innovationen seien Mangelware. Wie könnte man diesen Zustand überwinden und Entrepreneurship – unternehmerisches Handeln zur Verwirklichung innovativer Ideen – im Sektor fördern? Start-up-Unternehmen und ihre Gründer sind häufig Treiber einer solchen Dynamik. Doch der Rohstoff- und Recyclingbereich birgt besondere Herausforderungen für Start-ups. Im Transfer- und Gründerzentrum der RWTH Aachen, kurz TGZ, werden Unternehmensgründer durch erfahrene Berater begleitet. Die RWTH ist überdies Kern-Partner des 2015 gestarteten Innovationsnetzwerks „EIT Raw Materials“, einer Wissens- und Innovationsgemeinschaft des European Institute of Innovation & Technology EIT.

### **Merkmale des Rohstoff- und Recyclingsektors**

Der Rohstoff- und Recyclingsektor ist in seiner Struktur heterogen und besteht aus verschiedenen Industrien entlang der Erkundung, Förderung, Erzeugung, Verarbeitung und Wiederverwertung von Rohstoffen. Nichtsdestotrotz lässt sich eine Reihe von prägenden Merkmalen feststellen.

- In Teilen geringe Marktfragmentierung: Die Zahl der Marktteilnehmer in der Primärrohstoffindustrie ist im Allgemeinen geringer als in der Sekundärrohstoffindustrie. Insbesondere im Bereich der Förderung von Eisenerzen gibt es eine Konzentration auf wenige Unternehmen. Anders als in der Erzeugung metallischer oder auch industrieller Minerale bildet die Produktion von Baumineralen eine Ausnahme im Bereich der Primärrohstoffe, als hier viele kleinere und mittlere Unternehmen tätig sind. Im Recycling prägen sie ebenfalls das Bild, wenn es auch hier Ausnahmen gibt.
- Hohe Skaleneffekte: Häufig lassen sich Skaleneffekte beobachten, etwa im Bergbau oder auch Recycling. Dort entstehen Kostenvorteile durch steigende Produktionsgröße. Diese sind mitverantwortlich für die beschriebene Konzentration von Unternehmen in einigen Bereichen des Sektors.
- Beträchtliche Entwicklungskosten und Investitionsvolumina: Die Kosten für Forschung und Entwicklung sind bei technischen Innovationen hoch. Im Bergbau werden daher immer größere Unternehmen zur Finanzierung benötigt. Investitionskosten für technische Anlagen sind außergewöhnlich hoch. Im Bergbau werden die



Bild 1: Die Coaches des Transfer- und Gründerzentrums unterstützen Start-ups entlang des gesamten Gründungsprozesses, von der Idee über die Gründung bis zur Nachgründungsphase.  
Foto: Peter Winandy

- Investitionskosten für Kupferminen auf etwa 10.000 bis 20.000 US-Dollar pro Tonne jährlicher Förderkapazität geschätzt. Auch in der Wiederverwertung von Rohstoffen ist der Investitionsaufwand für Produktionsanlagen immens. So erfordert eine Schredderanlage für Stahlrecycling in Deutschland ein Investment in niedriger zweistelliger Millionenhöhe.
- Schwankende Marktpreise: Die globalen Rohstoffpreise sind seit der Jahrtausendwende deutlich sprunghafter. So waren die Preise für metallische Minerale in den Jahren 2001 bis 2011 fast doppelt so unbeständig wie in der vorangegangenen Dekade.
  - Geringe Innovationsaffinität: In weiten Teilen des Rohstoffsektors sind die Entscheider für Einkauf und Investitionen in der Tendenz risikoablehnend und halten sich an konventionelle, ihnen bekannte Technologien. Im Ergebnis sind Innovationszyklen relativ lang und ist die technologische Dynamik vergleichsweise gering.
  - Komplexe Regulierung: Die regulatorischen Anforderungen an die Rohstoff- und Recyclingindustrie sind in der Europäischen Union höher als in anderen Regionen und

Staaten der Welt. Die Komplexität der behördlichen Auflagen im Umweltschutz ist auch deswegen groß, weil es europäische und nationale Ebenen der Regulierung gibt, die nicht immer miteinander und über Staaten hinweg konsistent sind.

### Herausforderungen für Start-ups

Diese Strukturmerkmale des Rohstoff- und Recyclingsektors führen zu besonderen Her-

ausforderungen bei der Gründung und dem Wachstum von Start-ups. Es ergeben sich im Wesentlichen drei Hürden für Start-ups: Kapitalversorgung, Vermarktung sowie Know-how und Teamzusammenstellung. Kapitalversorgung: Die beträchtlichen Entwicklungskosten und Investitionsvolumina erfordern eine ausreichende Kapitalversorgung. Dies gilt umso mehr, als Skaleneffekte operative Größe mit geringeren Kosten belohnen –

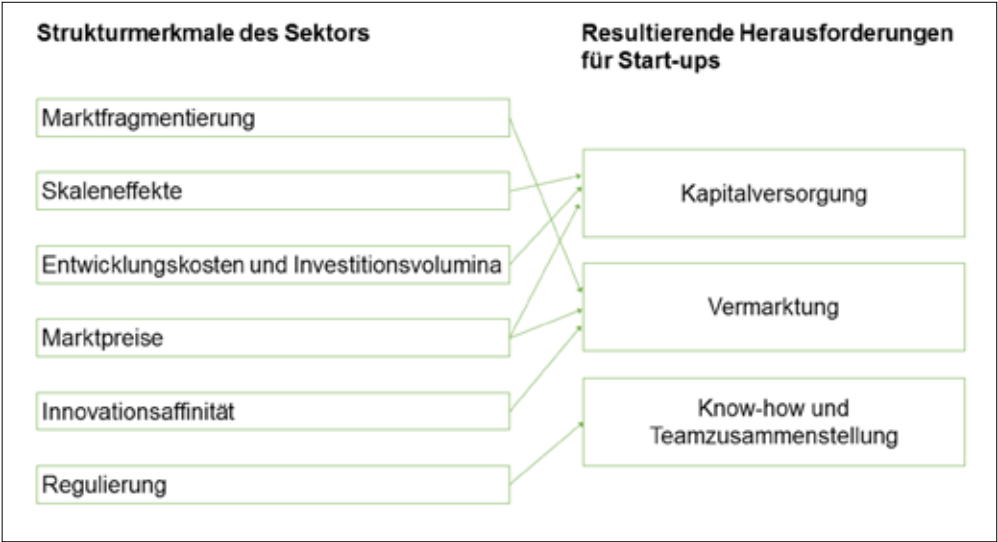


Bild 2: Schematischer Wirkzusammenhang zwischen Strukturmerkmalen des Sektors und resultierenden Herausforderungen für Start-ups.



Bild 3: Im StartLab erhalten Start-ups Beratung und Unterstützung, auch Arbeitsplätze werden zur Verfügung gestellt.  
Foto: Peter Winandy

also größere technische Anlagen einem Start-up bessere Grundlagen versprechen, mit etablierten Marktteilnehmern zu konkurrieren. Darüber hinaus scheuen Investoren die Risiken schwankender Rohstoffpreise. Ob eine Technologie in der Wiederverwertung von Rohstoffen rentabel ist, hängt insbesondere an den Weltmarktpreisen für Primärrohstoffe.

- **Vermarktung:** Start-ups haben im Rohstoff- und Recyclingbereich immer wieder Schwierigkeiten, ihre Innovationen bei potenziellen Kunden zu vermarkten. Großunternehmen in wenig fragmentierten Märkten können ihre Marktmacht ausspielen, um Kunden vom Kauf neuer, konkurrierender Produkte abzubringen. Hier mögen Wechselkosten wie Vertragsstrafen eine Rolle spielen. Schwankende Marktpreise für Rohstoffe können darüber hinaus zu Unsicherheit führen, inwieweit sich der Erwerb einer neuen Technologie rechnet. Daneben ist die geringe Innovationsaffinität der Industrie ein großer Faktor.
- **Know-how und Teamzusammensetzung:** Start-ups sehen sich schließlich vor der Schwierigkeit, das nötige Know-how sicherzustellen, um innovative Ideen tat-

sächlich bis zur Marktreife zu bringen und dann erfolgreich im Markt zu kommerzialisieren. Zum einen zählen dazu die spezifischen Kenntnisse der regulatorischen Anforderungen, die insbesondere im Recycling eine Schlüsselrolle einnehmen. Zum anderen gehören dazu unternehmerische Fähigkeiten, die über die Entwicklung der eigentlichen Innovation hinausgehen. Häufig scheitern Start-ups im Rohstoffbereich an der Wandlung von Forschern zu Unternehmern. Die Teamzusammensetzung ist insofern von Bedeutung.

### **Maßgeschneiderte Entrepreneurship-Förderung**

Zum Meistern dieser Herausforderungen unterstützt die RWTH Start-ups im Rohstoff- und Recyclingbereich einerseits über ihr Transfer- und Gründerzentrum, andererseits über die Förderinstrumente des EIT. Im Transfer- und Gründerzentrum und seinem Inkubator „StartLab“ begleiten Gründerberater vertraulich und kostenlos gründungsinteressierte Teams aus der RWTH. Dabei leisten sie Hilfe bei der Kapitalversorgung, indem sie die Finanzplanung prüfen und bei Anträgen



Bild 4: Drei strategische Ziele des EIT und vier Fokusbereiche.  
Quelle: EIT Raw Materials

für Fördergelder sowie der Gewinnung von Privatinvestoren unterstützen. Darüber hinaus richtet das Transfer- und Gründerzentrum Veranstaltungen wie die Aachen Technology Entrepreneurship Conference ATEC aus, an denen sich Unternehmen beteiligen. Dies kann bei der Vermarktung helfen. Schließlich stellt das Zentrum sein Netzwerk an Experten, Förderpartnern und Gründungsinteressierten zur Verfügung, um Know-how-Lücken zu schließen und bei der Teamzusammensetzung zu helfen.

Die RWTH ist außerdem Kern-Partner des „EIT Raw Materials“, eines langfristigen Netzwerkvorhabens der EU zur Verringerung ihrer Rohstoffabhängigkeit. Mit mehr als 100 Partnern aus Bildung, Forschung und Innovation ist es das weltweit größte Konsortium seiner Art.

Das EIT hat ein erstes Instrumentarium zur Förderung von Start-ups und Entrepreneurship entworfen, das maßgeschneidert für den Rohstoff- und Recyclingbereich ist. An Erweiterungen wird gearbeitet.

Für eine Kapitalversorgung gibt es drei Fördermöglichkeiten: Über das „Kick-start Funding“ sind bis zu 50.000 Euro Sofortbeihilfe

verfügbar, um beispielsweise eine Machbarkeitsstudie zu finanzieren. Über den „Start-up Booster“ werden Vouchers im Wert von bis zu 60.000 Euro zur Nutzung technischer Infrastruktur ausgeschrieben. Schließlich erarbeitet das EIT das so genannte „Funding Instruments“-Programm, mit dem es sich mit bis zu 200.000 Euro direkt an geeigneten Start-ups beteiligen und so selbst als Investor auftreten wird.

Zur Vermarktung der Innovationen bietet das EIT eine Reihe von Instrumenten: Start-ups können auf die „Entrepreneurship Support Services“ zurückgreifen. Dahinter verbirgt sich das Netzwerk an Inkubatoren und Gründerzentren innerhalb des EIT, das zum Beispiel dabei unterstützt, an potenzielle Kunden heranzutreten. Daneben veranstaltet das EIT „Idea Camps & Business Plan Competitions“, in denen Gründer an ihren Geschäftsmodellen arbeiten können. „Matchmaking & Brokerage Events“ runden das Angebot ab. Hier werden Investoren, etablierte Unternehmen, Start-ups und Forscher zusammengebracht.

Da Entrepreneurship auch in KMU und Großkonzernen stattfinden kann, hat das EIT weitere Förderwerkzeuge erstellt. Über den „SME Growth Booster“ beispielsweise können sich KMU um Unterstützung bei Expansionsplänen bemühen. Interessierte Gründer und Unternehmer können sich an das TGZ der RWTH ([www.gruenderzentrum.rwth-aachen.de](http://www.gruenderzentrum.rwth-aachen.de)) oder direkt an das EIT ([www.eitrawmaterials.eu](http://www.eitrawmaterials.eu)) wenden.

## Autoren

Univ.-Prof. Dr.rer.pol. Malte Brettel ist Inhaber des Lehrstuhls Wirtschaftswissenschaften für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Nils Eiteneyer, M.Sc., ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Wirtschaftswissenschaften für Ingenieure und Naturwissenschaftler.

Alexander Birich, Karl Bernhard Friedrich, Ann-Kathrin Pophanken,  
Elinor Rombach, Anna Trentmann

# Gemeinsam agieren

## Aufbau transdisziplinärer Rohstoffnetzwerke

The continuously growing public interest in sustainable resource technologies shows the necessity of interdisciplinary problem solving, which has promoted the formation of different types of networking structures – local, national and Pan-European – such as competence centers in the past years. RWTH has already established a leading role in three of these centers, and the high level collaboration in these communities shows the strong international integration of many research institutes in the resource sector.

In den letzten Jahren ist das öffentliche Interesse an Themen im Bereich der Ressourcentechnologie enorm gestiegen. Die Frage, wie mit einer Ressource nachhaltig und umweltverträglich gewirtschaftet werden kann, ist dabei so vielseitig, dass sie aus technologischer Sichtweise nur mit fachübergreifenden Problemlösungen beantwortet werden kann. Die Ressourcen, um die es dabei im Einzelnen geht, können natürlicher oder anthropogener Herkunft sein. Die Komplexität der Problemlösungen erfordert deshalb sowohl eine enge Zusammenarbeit von Hochschuleinrichtungen untereinander als auch mit Wirtschaftsunternehmen und politischen Institutionen. Dies führte in den letzten Jahren zwangsläufig zur Gründung von Kompetenzzentren, die lokal, national und europaweit gesteuert werden, stets aber international agieren. Die RWTH Aachen hat in dreien dieser Netzwerke eine führende Rolle eingenommen.

### **Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie AKR e.V.**

Der Weg von der Erschließung nicht erneuerbarer Ressourcen beziehungsweise der Nutzbarmachung erneuerbarer Ressourcen bis hin zur Wiederverwertung von so genannten „end-of-life“-Produkten verläuft entlang einer Prozesskette, die diverse Disziplinen wie Bergbau, untertägiger Ingenieurbau, Metallurgie und Metallrecycling sowie Rohstoff-, Material- und Umwelttechnik einbindet. Um

die Initiierung und Koordination von integrierten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zwischen Industrieunternehmen und Hochschuleinrichtungen zu erleichtern, haben sich über 20 Professoren und Professorinnen der RWTH im „Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie – AKR e.V.“ zusammengeschlossen. Ziel ist, die Forschung auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu verstärken sowie technisches und fachliches Wissen aus den Bereichen Rohstoffrecht und Rohstoffwirtschaft einzubinden.

Bei der Analyse nationaler und internationaler Forschungsprogramme im Bereich der Ressourceneffizienz, insbesondere auf europäischer Ebene, sind vier Säulen zu nennen: Primäre Rohstoffe, Sekundäre Rohstoffe, Substitution und Rohstoffeffizienz.

Werden diese vier Rohstoffsicherungspotenziale mit der aktuellen Versorgungssituation in der Europäischen Union in Beziehung gesetzt, so wird gerade für das Beispiel der Bundesrepublik Deutschland deutlich: Der gesellschaftliche Bedarf kann zurzeit häufig nur durch Importe, zunehmend aber durch eine effiziente Wieder- und Weiterverwertung und im Falle kritischer Rohstoffe häufig nur durch ihre Substitution, also einen Ersatz, gedeckt werden.

Ein industrieller Beirat soll die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie fördern sowie den technisch-wissenschaftlichen Fort-

schritt vorantreiben. Ein Fokus der Zielsetzung ist unter anderem die Entwicklung und Begleitung grundlegender wie auch anwendungsbezogener Modellprojekte mit hohem Neuerungscharakter und Demonstrationswert wie zum Beispiel von „zero-waste“-Prozessen. Eine Stärke des Kompetenzzentrums ist, dass es auf Netzwerke zwischen Instituten und Industriepartnern samt der damit verbundenen Infrastruktur zurückgreift. Der Vereinsstatus ermöglicht den Industrieunternehmen einen schnellen und unkomplizierten Start von Forschungs- und Entwicklungsprojekten, die im normalen Industriebetrieb aufgrund ihrer Kosten- und Planungsstruktur schwer durchführbar sind. Solche gemeinschaftlichen Vorhaben haben nicht nur einen wirtschaftlichen Nutzen, sondern ergänzen die strategische Ausrichtung der Unternehmen sowie der Institute.



Bild 1: Inhaltliche Struktur des Aachener Kompetenzzentrums für Ressourcentechnologie.

**German Resource Research Institute  
GERRI**

Mit dem German Resource Research Institute, kurz GERRI, wird ein nationales Netzwerk aufgebaut, das als zentrale Anlaufstelle die Aktivitäten der deutschen Rohstoffakteure in Forschung und Entwicklung koordinieren wird. Dieses im Februar 2015 gestartete Projekt ist eingebettet in die Hightech-Strategie für Deutschland des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in das Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA). Das Projektteam besteht aus den fünf führenden Forschungseinrichtungen des deutschen Rohstoffsektors, die jeweils durch ein Institut oder eine Projektgruppe vertreten sind. Der thematische Fokus liegt auf Hochtechnologiemetallen und wirtschaftsstrategischen Rohstoffen, die für die Umsetzung von Zukunftstechnologien besonders wichtig sind. Nach Ablauf der Förderphase soll GERRI als eigenständiges virtuelles Institut fortbestehen und sich unter anderem über eingeworbene Industrie- und Forschungsgelder insbesondere auf europäischer Ebene finanzieren. Bis dahin sollen die wichtigsten deutschen Rohstoffakteure als Zielgruppen miteinander vernetzt worden sein. Auf der im Projektverlauf zu entwickelnden GERRI-Plattform werden Kernkompetenzen und Infrastrukturen der Partner transparent dargestellt und für die gemeinschaftliche Nutzung geöffnet. So können künftig Synergien besser erschlossen und Forschungsstrategien zielorientiert aufeinander abgestimmt

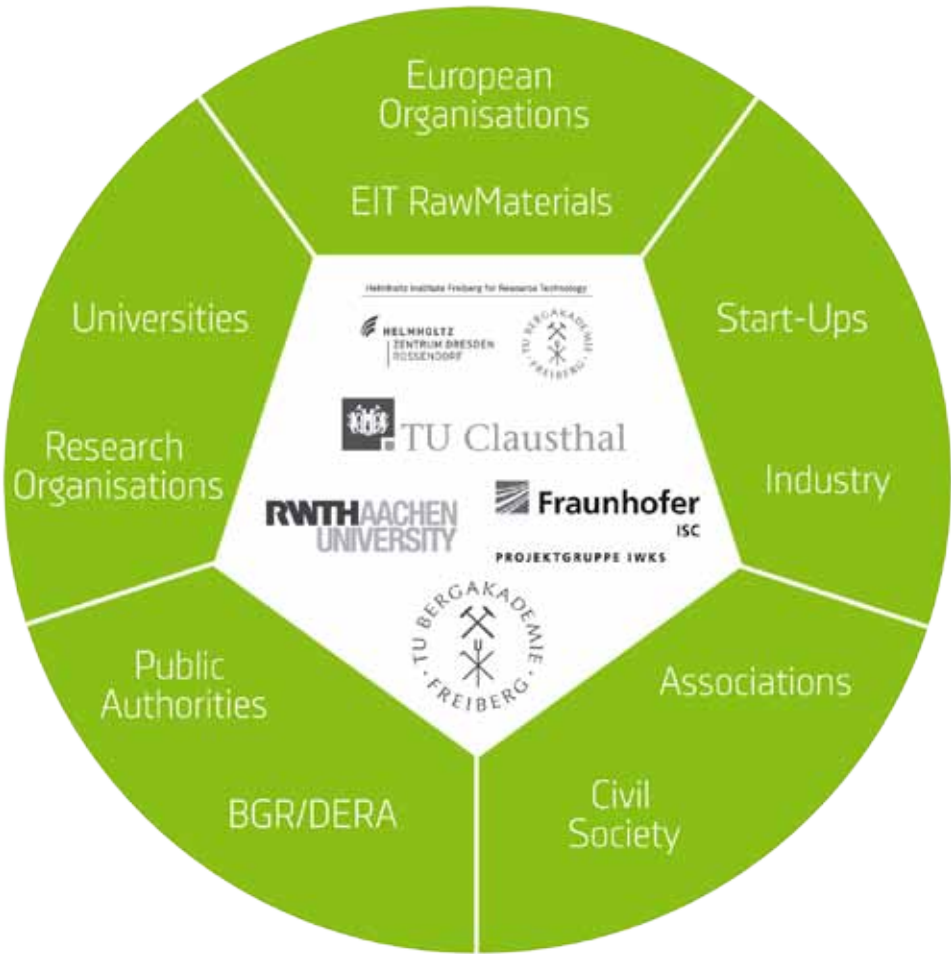


Bild 2: Gründungspartner (innen) und Zielgruppen (außen) des Netzwerkverbundprojekts GERRI.

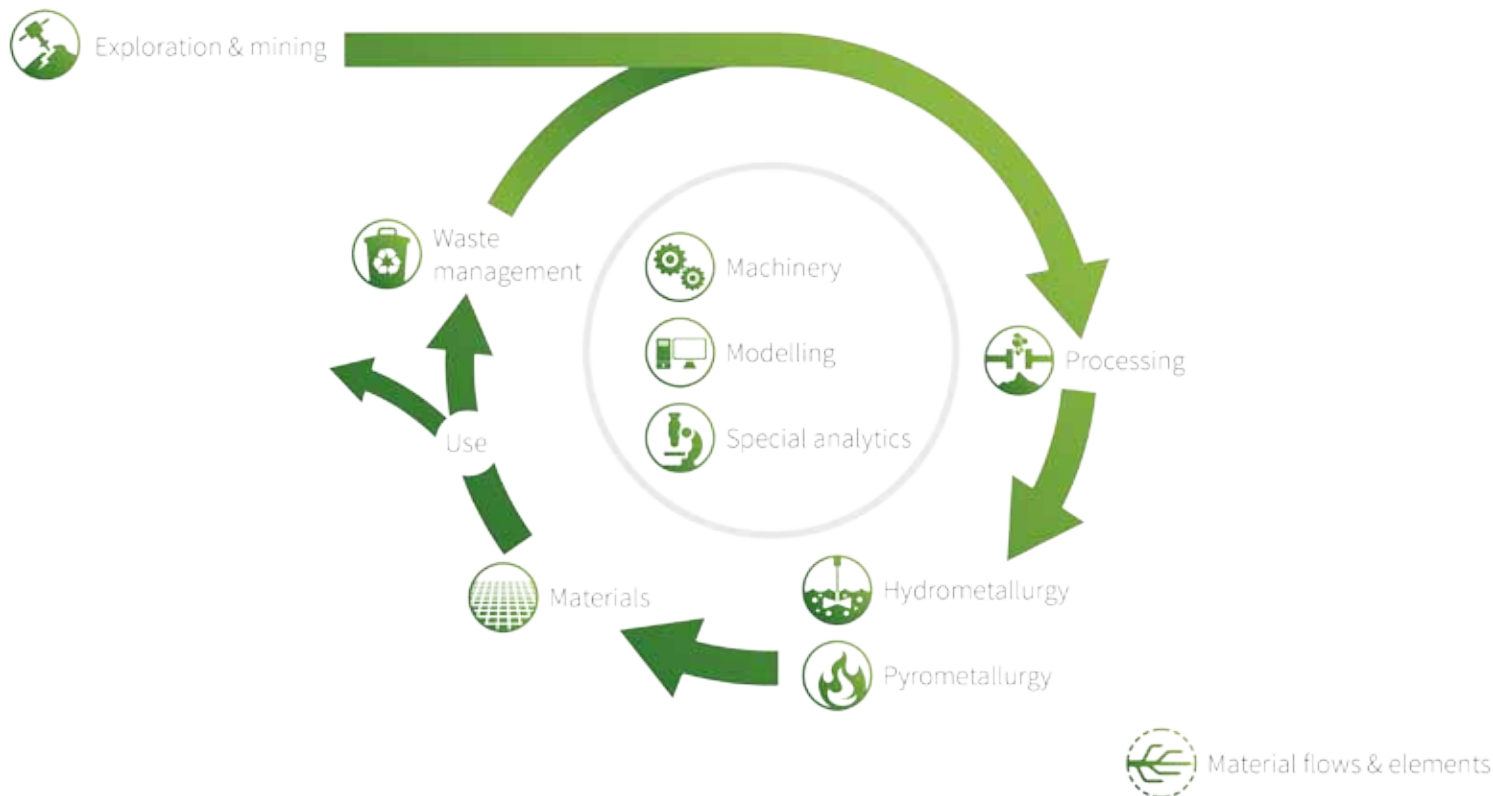


Bild 3: Kernkompetenzen im virtuellen Institut GERRI.

werden. Das Portfolio der Gründungspartner umfasst die neun Kompetenzbereiche: Exploration und Bergbau, Aufbereitung, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie, Werkstoffe, Abfallwirtschaft, Maschinenbau, Modellierung sowie Spezialanalytik. Innerhalb dieser Kompetenzbereiche soll eine gut strukturierte Suchkorrelation zwischen den verfahrenstechnisch verfügbaren Methoden beziehungsweise Prozessaggregaten und den Stoffströmen beziehungsweise Zielelementen entwickelt und abgebildet werden. Alleinstellungsmerkmal dieses Kompetenzverbundes ist es, effiziente Lösungsansätze für transdisziplinäre Fragestellungen insbesondere an den Schnittstellen der mineralisch/metallhaltigen Wertschöpfungskette aufzeigen zu können. Als nationale virtuelle Koordinierungsstelle deckt GERRI zukünftig folgende Aufgabenfelder ab:

- Repräsentation der gesamten deutschen Rohstoff-Forschungsexzellenz auch im internationalen Umfeld,
- Bildung einer zentralen Anlaufstelle insbesondere für internationale Akteure aus Forschung, Wirtschaft und Politik,
- Etablierung als Innovationskatalysator für ressourceneffiziente Technologieentwicklung „made in Germany“.

### Knowledge & Innovation Community EIT RawMaterials GmbH

Zur Steigerung der europäischen Wettbewerbsfähigkeit im Rohstoffsektor hat das EIT (European Institute of Innovation and Technology) im Januar 2015 mit der Knowledge & Innovation Community (KIC) „EIT RawMaterials“ ein langfristig angelegtes internationales Netzwerkvorhaben ins Leben gerufen. Mit einem Projektvolumen von etwa zwei Milliarden Euro und mit über 120 Partnern aus Bildungs- (37 Prozent) und Forschungseinrichtungen (29 Prozent) sowie aus der Industrie (34 Prozent) ist dies das weltweit stärkste Konsortium im Rohstoffsektor. Die RWTH-Aktivitäten innerhalb dieser europäischen Rohstoffcommunity werden durch Fördergelder des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen sowie des RWTH-Strategiefonds bezuschusst.

Die mineralische und metallische Rohstoffbasis soll im Sinne einer zukunftsfähigen, nachhaltigen Wirtschaftsgesellschaft entlang kompletter Wertschöpfungsketten erweitert werden, insbesondere durch Anwendung innovativer Verfahren. Ansatzpunkte hierfür liefern die sechs Themengebiete für „EIT RawMaterials“:

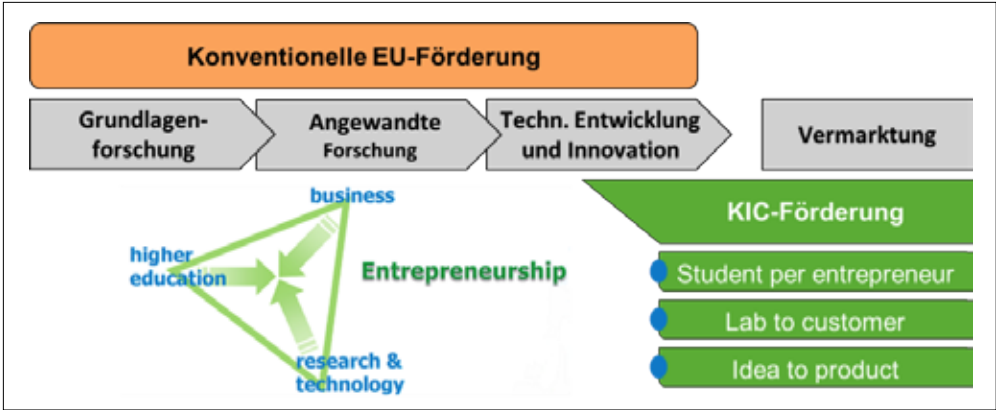


Bild 4: Zielrichtung des EIT-Förderinstruments KIC.



Bild 5: Gegenüberstellung der Ziele und Arbeitsbereiche von EIT RawMaterials und GERRI.

- Verbesserung der Exploration und Ressourcenbewertung,
- Mining in anspruchsvollen Umgebungen,
- Ressourceneffiziente Gestaltung von Prozessketten,
- Recyclingintensivierung (End-of-Life Produkte, geschlossene Materialkreisläufe),
- Substitution von kritischen und toxischen Produktbestandteilen, sowie
- Design von Produkten und Dienstleistungen für die Kreislaufwirtschaft.

Die damit verbundenen Fördermaßnahmen umfassen sowohl die Spitzenforschung zum Scale-Up und damit zur Maßstabsvergrößerung innovationsorientierter und erfolgreich erforschter Prozesse im Rohstoffbereich als auch die Verbreitung und Kommerzialisierung von Innovationen.

Das Spektrum möglicher Projekte in den Bereichen Bildung/Forschung bietet für Rohstoffakteure der RWTH Aachen ein hohes Potenzial. Diese innovative Förderressource ist daher zur Steigerung der fachlichen Kompetenzen, der internationalen Sichtbarkeit und der Drittmiteleinwerbung effektiv nutzbar. Bereits erarbeitete Forschungsergebnisse können transdisziplinär und unter Industrieinbindung ausgeweitet und validiert, kommuniziert und gelehrt sowie standortnah

technologisch verwertet werden. Ziele für die RWTH liegen entsprechend in den Bereichen:

- Initiierung innovativer Forschungsfelder und Bildung von Forschungskonsortien insbesondere im Themenfeld ressourceneffizientes Recycling,
- Realisierung von Demonstrationszentren zum Beispiel für Metallrecycling,
- Entwicklung passgenauer Ausbildungskonzepte,
- Einbindung eigener Netzwerkstrukturen (AKR e.V., Aachen Entrepreneurship Gründerzentrum, Zentrum für Lern- und Wissensmanagement) und externer Forschungsstrukturen wie beispielsweise GERRI,
- Einbindung von Industriepartnern, insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen aus NRW, sowie von NRW Landesclustern und weiteren Forschungs- und Wirtschaftsinstitutionen.

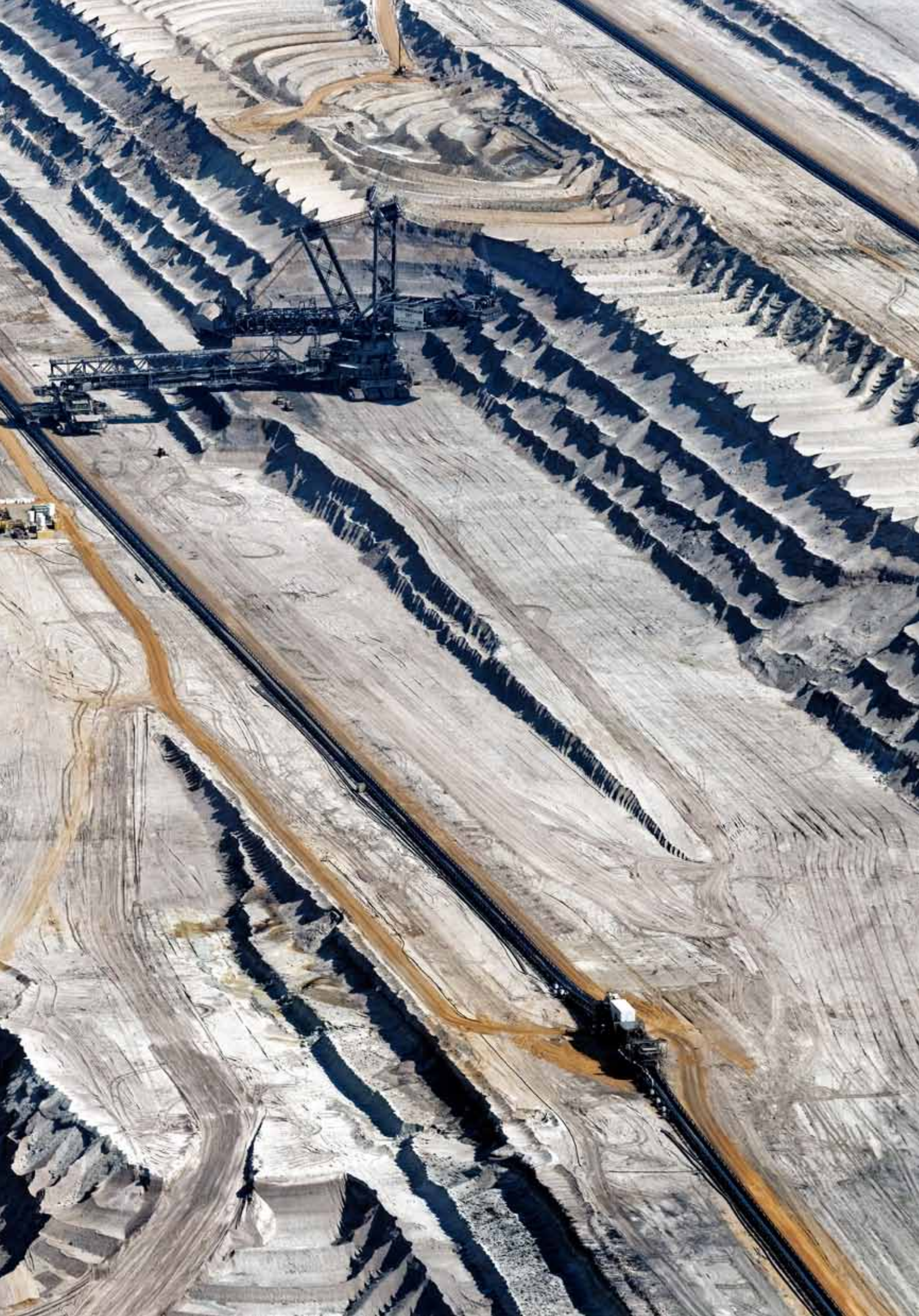
An diesen drei Beispielen wird deutlich, wie stark die Forschungsinstitute der RWTH auf dem Rohstoffsektor international vernetzt sind und ihre Kompetenz sichtbar machen.

## Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Bernhard Friedrich ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling und Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie. Alexander Birich, M.Sc., Dipl.-Ing. Ann-Kathrin Pophanken, Dr.-Ing. Elinor Rombach und Anna Trentmann, M.Sc., sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling.



tagebau Hambach.  
Foto: Peter Winandy



### **Fortschrittskolleg VERBUND.NRW**

Zum Oktober 2016 ist das Fortschrittskolleg „VERBUND.NRW – Ressourceneffizienzsteigerung beim Einsatz von Verbundwerkstoffen und –konstruktionen im Bauwesen“ gestartet. Es ist eines von sechs Kollegs, die im Rahmen der Strategie „Fortschritt NRW“ mit jeweils 2,72 Millionen Euro vom Land NRW gefördert werden. Ziel ist, die Lebensqualität der Menschen zu verbessern.

In VERBUND.NRW arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der RWTH Aachen und der FH Münster interdisziplinär an der gesamten Wertschöpfungskette für Verbundwerkstoffe im Baubereich. Im Fokus stehen technologische, ökologische, ökonomische und sozialologische Fragestellungen. Seitens der RWTH sind die Lehrstühle für Controlling, für Operations Management, für Baustoffkunde sowie für Technik und Organisationssoziologie beteiligt. Auch die Lehr- und Forschungsgebiete Internationale Wirtschaftsbeziehungen sowie Technologie der Energierohstoffe und die Institute für Textiltechnik sowie für Aufbereitung und Recycling arbeiten in VERBUND.NRW.

Verbundstoffe oder Verbundkonstruktionen erfüllen bei technischen Konzepten eine Vielzahl an Anforderungen, dazu gehören Multifunktionalität, Design, Gewicht oder Kosten. Das Fortschrittskolleg verknüpft die Aspekte Verbund und Bauwerk und adressiert entlang der Wertschöpfungskette „Entwicklung/Produktion, Konstruktion/Verarbeitung, Nutzung/Entsorgung sowie Rückbau/Recycling“ die gesellschaftliche Herausforderung „Klimaschutz, Steigerung der Ressourceneffizienz und Rohstoffrückgewinnung“.

Am Institut für Textiltechnik wird beispielsweise zum Bereich Konstruktion/Verarbeitung geforscht. Die Verwendung von Verbundwerkstoffen und -konstruktionen kann insbesondere dann erheblich zur Ressourcenschonung beitragen, wenn bereits beim Design neben der Nutzungs- auch die Nachnutzungsphase der Materialien berücksichtigt wird. Daher werden Anforderungen hinsichtlich der Separierbarkeit beim Recycling und der Wiederverwertbarkeit untersucht. Anhand von Demonstratoren werden Sekundärwerkstoffe technisch gegenüber Primärwerkstoffen validiert. Auch von wirtschaftlicher Seite werden die entwickelten Lösungen bewertet.

### **Zusammenarbeit mit IITM Madras**

Das Indian Institute of Technology Madras IITM und die RWTH Aachen werden im Rahmen ihrer strategischen Partnerschaft weiter zusammenarbeiten. Beide Hochschulen haben zur Finanzierung der Partnerschaft ein vierjähriges Förderprogramm beim Deutschen Akademischen Austauschdienst DAAD und der indischen University Grant Commission eingeworben. Bis Mitte 2020 stehen in Aachen und in Madras jeweils rund 400.000 Euro zur Verfügung. Ziel ist es, den Austausch von Studierenden sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu fördern und die Kooperation zu intensivieren. Workshops, Kurse, Konferenzen, Summer Schools, die Vernetzung mit außeruniversitären Partnern und der Aufbau gemeinsamer Infrastrukturen sollen hierzu beitragen. Bei einem Treffen wurden künftige Projekte beispielsweise in den Bereichen Ingenieurwesen, Energie, Materialwissenschaft, Medizintechnik, Um-

für die interdisziplinäre und vernetzte Energieforschung gesetzt. Das E.ON ERC wird seit der Gründung im Jahre 2006 von Rik W. De Doncker, Inhaber des Lehrstuhls und Leiter des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, geleitet.

### **Willy-Korf-Award für Bernhard Steenken**

Bernhard Steenken, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl, wurde mit dem Willy-Korf-Award for Young Excellence für seine herausragende Forschung über die industrielle Herstellung so genannter Advanced High Strength Steels ausgezeichnet. Die Verleihung fand auf der AMM & WSD Steel Success Strategies Konferenz in New York statt. Die zum Gedenken an den 1990 verstorbenen Stahlindustriellen Willy Korf gegründete Stiftung ehrt jährlich zwei herausragende Leistungsträger der Stahlbranche.

# Namen & Nachrichten

welt und Biologie geplant und eine Zusammenarbeit in den Bereichen Entrepreneurship, digitale Lehre, Vernetzung von Studierenden-Initiativen und Alumni-Arbeit diskutiert.

### **Kooperationsvertrag mit E.ON**

E.ON und die RWTH Aachen haben ihren Kooperationsvertrag um weitere fünf Jahre verlängert. Eine entsprechende Vereinbarung unterzeichneten E.ON Vorstandsmitglied Karsten Wildberger und der Rektor Ernst Schmachtenberg. Inhalt der Zusammenarbeit ist, die Potenziale der Einsparung von Energie und nachhaltiger Energieversorgung zu erforschen und daraus neue Angebote und Lösungen für Kunden zu entwickeln. Die Forschung ist am E.ON Energy Research Center gebündelt und konzentriert sich auf die Gebiete Erneuerbare Energien, zukunftsfähige Stromnetze und effiziente Gebäudetechnik. Das E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) ist ein zukunftsweisendes Modell einer öffentlich-privaten Partnerschaft zwischen Industrie und Wissenschaft und hat Maßstäbe

### **RWTH in „POLICE“ engagiert**

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie fördert im Rahmen des Programms „ELEKTRO POWER II“ das Projekt „PrOlonged Life Cycle for Electric Vehicles“, kurz „POLICE“. Um elektrisch betriebene Fahrzeuge wettbewerbsfähiger zu gestalten, stehen in den nächsten drei Jahren 1,5 Millionen Euro zur Verfügung. Am Forschungsprojekt sind seitens der RWTH der Lehrstuhl Production Engineering of E-Mobility Components und das Werkzeugmaschinenlabor beteiligt. Auch die Unternehmen StreetScooter GmbH, Futavis GmbH, Stratasys GmbH und Dekra Automobil GmbH sowie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. engagieren sich in POLICE. Im Vordergrund der Forschung steht die Vervielfachung der Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen. Dies kann beispielsweise durch modular updatefähige Fahrzeugsoftware und -hardware erreicht werden. So sollen die hohen Anschaffungspreise von Elektrofahrzeugen durch niedrige Betriebskosten und spätere Updatemöglichkeiten kompensiert werden.

## Auszeichnung für Professor Schwaneberg

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Ulrich Schwaneberg vom Lehrstuhl für Biotechnologie wurde mit dem Forschungspreis 2016 „Nächste Generation biotechnologischer Verfahren – Biotechnologie 2020+“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ausgezeichnet. Dieser ist mit 1,7 Millionen Euro dotiert. Mit der Vergabe des Preises sollen herausragende Resultate anerkannt werden, die in Hochschulen, Forschungseinrichtungen oder auch Unternehmen erzielt wurden. Der Preis dient dazu, das aufgebaute Know-how zu sichern, auszubauen und für die Entwicklung neuer Verfahren nutzbar zu machen. Schwaneberg entwickelte unter dem Projekttitel „Selektive P450- und Ganzellhybridkatalysatorsysteme in synthetischen Biofilmen“ eine Technologieplattform, die Produktionsorganismen für die Stoffproduktion in organischen Lösungsmitteln nutzbar macht. Hieran waren die Arbeitsgruppe „Mikrogele“ von Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Andrij Pich vom Lehrstuhl für Textilchemie und Molekulare Chemie und die Arbeitsgruppe „Hybridkatalysatoren“ unter Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Jun Okuda, Inhaber des Lehrstuhls für Metallorganische Chemie, beteiligt. Nach natürlichem Vorbild werden Nanogelee verwendet, die an Zellen haften und künstliche Biofilme erzeugen. Diese schützen die Zellen vor den organischen Lösungsmitteln, ohne den Stofffluss erheblich zu behindern. Die Anbindung der Nanogelee an die Oberfläche der Bakterien erfolgt über so genannte Ankerpeptide. Hierfür wurde das Kolibakterium „E. coli“ ausgewählt. Das Forschungsvorhaben von Schwaneberg ermöglicht innovative Prozesse besonders bei Verbindungen, die in Wasser kaum löslich sind. Das sind zum Beispiel Steroide, aromatische und zyklische Kohlenwasserstoffe, aus denen Polymere, Duftstoffe oder Vorstufen von Pharmazeutika hergestellt werden.

## RWTH unter den 100 besten Hochschulen weltweit

Die RWTH schafft es in diesem Jahr erstmalig, sich unter den 100 besten Hochschulen der Welt zu positionieren. Das Times Higher Education World University Ranking, THE Ranking, belegt dies in seiner Ausgabe vom September. Das THE Ranking gehört zu den bedeutendsten Hochschulrankings weltweit und wird jährlich von dem in London ansässigen Unternehmen Times Higher Education herausgegeben. Neben der Reputation, die die Universitäten weltweit bei Akademikern

haben, fließen auch Daten zu Publikationen, Hochschulfinanzen, Mitarbeitern und Absolventen in die Berechnungen der Ranglisten ein.

Mit Platz 78 erzielt die RWTH ihr bisher bestes Ergebnis in diesem Hochschulranking. Dieses Ergebnis lässt sich nicht nur auf einen Indikator zurückführen. In beinahe allen Bereichen erhält die RWTH mehr Punkte als in den Vorjahren. Sowohl in den Bereichen Lehre, Forschung und Finanzen, als auch bei den Zitationen werden deutliche Verbesserungen erzielt. Besonders gut schneidet die Hochschule bei den Finanzmitteln aus der Industrie ab, hier erhält sie 99,4 von 100 Punkten. Dies dokumentiert die gute Zusammenarbeit mit der Industrie, von der nicht nur die Forschung, sondern auch die Studierenden mit einem praxisnahen Studium profitieren.

## David Hellmanns mit Nachwuchsförderpreis geehrt

Für seine Bachelorarbeit „Making Individual Cloud Usage of Smartphone Users Transparent“ erhielt David Hellmanns den Nachwuchsförderpreis Verbraucherforschung. NRW-Wissenschaftsministerin Svenja Schulze, NRW-Verbraucherschutzminister Johannes Remmel und NRW-Verbrauchszentralenvorstand Wolfgang Schuldzinski überreichten die Auszeichnung im Rahmen der International Conference on Consumer Research (ICCR) 2016. Der Preis wird jährlich vom Projekt Kompetenzzentrum Verbraucherforschung NRW für wissenschaftlich hervorragende Examensarbeiten zu praxisrelevanten Verbraucherthemen vergeben. Hellmanns zeigte in seiner Arbeit, wie Funktionen von Cloud-Diensten mittels einer App transparent gemacht werden können und wie sich die Privatsphäre der Verbraucher bei der Verwendung solcher externer Datenspeicher besser schützen lässt. Die Bachelorarbeit wurde am Lehrstuhl für Informatik 4 (Kommunikation und verteilte Systeme) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle betreut.

## Erforschung von Energiespeichern in CARL

Der Wissenschaftsrat hat für das „Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems“, kurz CARL, knapp 60 Millionen Euro Fördergelder bewilligt. Bis 2020 entsteht auf dem Campus Melaten ein Zentrum zur grundlegenden Erforschung der Alterung von Batteriematerialien und leistungselektronischen Systemen. Die komplette Prozesskette

von der Herstellung bis zur Anwendung steht dabei ebenso im Fokus wie der Lebenszyklus sämtlicher Materialien und Komponenten. Mit den Fördermitteln werden auch drei große Laborbereiche errichtet. Im ersten wird es Prüfstände für Belastungs- und Umweltsimulationen geben. Es geht beispielsweise um elektrische, mechanische, chemische oder klimatische Einflüsse auf Material und Systeme von Batterien und Leistungselektronik. Der zweite Laborbereich befasst sich mit dem Bau von Prototypen. Die Leistungsfähigkeit ganzer Systeme oder auch einzelner Bauteile soll hier untersucht werden, um beispielsweise Material- oder Konstruktionsfehler frühzeitig ausschließen zu können. Der dritte Laborbereich widmet sich schließlich der physikalisch-elektrochemischen Analyse. Mit Hilfe einer Analyseketten für Struktur- und Materialuntersuchungen, zu der unter anderem ein hochmoderner Computertomograph mit bisher nicht erreichter Auflösung zählen wird, können die Strukturen des Materials bis zur atomaren Auflösung analysiert werden. Die Erkenntnisse aller Laborbereiche werden zusammengeführt, um Simulationen zu erstellen und Lebensdauerprognosen für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche und Nutzungsprofile abzuleiten. Gleichzeitig wird damit die Beschleunigung von Innovationszyklen bei der Neuentwicklung von Materialien und Systemen erreicht.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Disziplinen Chemie, Physik, Mathematik, Informatik oder Materialwissenschaft, Maschinenbau und Elektrotechnik von RWTH und Forschungszentrum Jülich werden hier zusammenarbeiten. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uwe Sauer vom Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik ist Sprecher des Projekts.

## Fahrsimulator in Betrieb

Am Institut für Kraftfahrzeuge ist ein hochdynamischer Fahrsimulator in Betrieb gegangen. Dieser ermöglicht die Abbildung des Fahrverhaltens bis in den fahrdynamischen Grenzbereich und ist ein Werkzeug zukünftiger automobiler Mobilität. Der Simulator kann in der Forschung eingesetzt werden, um ein neuartiges Fahrerlebnis darzustellen, das technologisch noch nicht umsetzbar wäre. Auch sichert er die Wirksamkeit und Akzeptanz von Funktionen ab, weil er kritische Verkehrssituationen exakt nachbildet und wiederholt, ohne den Fahrer zu gefährden. Mit dem Fahrsimulator wurde das neu errichtete Institutsgebäude sowie eine einmalige

Temperier-Akustikkammer für thermische und/oder akustische Untersuchungen von Fahrzeugen offiziell in Betrieb genommen.

### Einzigartiges Testfeld

Ein Projektkonsortium errichtet ein bundesweit einzigartiges Testfeld in Aldenhoven. Das Testfeld entsteht im Rahmen des Vorhabens „CERMcity“, an dem neben der RWTH Aachen das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), die FH Aachen, der TÜV Rheinland sowie die Firmen BASEL-ABS und Silicon Radar beteiligt sind. Auf Seiten der RWTH Aachen wird das Projekt durch das Institut für Kraftfahrzeuge, das Institut für Regelungstechnik sowie das Institut für Hochfrequenztechnik bearbeitet. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt das Projekt mit rund 3,3 Millionen Euro. In den kommenden drei Jahren werden die Möglichkeit für die Erprobung und Absicherung von automatisierten und vernetzten Fahrfunktionen geschaffen – mit besonderem Fokus auf urbane Anwendungen. Das Streckenelement wird aus typischen Elementen bestehen, die städtische Verkehrsbereiche ausmachen, etwa Kreuzungen, Ampeln, Kreisverkehre, Bushaltestellen, Parkbuchten oder Bahnübergänge.

### VDI verleiht International Bionic Award

Der International Bionic Award der Schauenburg-Stiftung ging an ein vierköpfiges, interdisziplinär zusammengesetztes Team aus Aachen und Linz. Für ihre herausragende Forschungsarbeit erhielten Dr.rer.nat. Philipp Comanns vom Lehr- und Forschungsgebiet Molekulare und systematische Neurophysiologie, Kai Winands und Mario Pothen vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT Aachen sowie Gerda Buchberger, Johannes Kepler Universität Linz, die Auszeichnung vom VDI. Die Wissenschaftler haben Strukturen entwickelt, um Flüssigkeiten energieneutral in eine gezielte Richtung auf Oberflächen zu transportieren. Ihr Vorbild war dabei die texanische Krötechse.

### Personalchefs finden RWTH Spitze

Die Absolventinnen und Absolventen der RWTH gehören zu den Favoriten deutscher Unternehmen, dies belegen die Ergebnisse im Hochschulranking des Magazins Wirtschaftswoche. 500 Personalverantwortliche werden jedes Jahr gefragt, welche Hochschulen nach ihrer Einschätzung die beste Ausbildung vermitteln. Hinsichtlich der Ingenieurwissenschaften herrscht große

Einigkeit: Bewerberinnen und Bewerber von der RWTH Aachen gelten als besonders qualifiziert. Gründe für die guten Bewertungen der Aachener Hochschule liegen in ihrer Interdisziplinarität sowie in der Ausrichtung auf Digitalisierung und Zukunftstechnologien. Die Forschungsstärke der Wissenschaftler und die Anwendungsnähe kämen den Studierenden zugute, die damit bestens auf das Berufsleben vorbereitet würden. Die gute Reputation der RWTH Aachen zeigte sich schon in den bisherigen Rankings. So wurden in den vergangenen Jahren in den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Wirtschaftsingenieurwesen und Naturwissenschaften stets Platzierungen in den TOP 3 erreicht.

### 30 Jahre Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Die Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen feierte ihr 30-jähriges Jubiläum mit einem Festakt. Seit ihrer Gründung im Jahr 1986 verzeichnet sie wachsende Studierendenzahlen. Um sich an internationalen Qualitätsstandards zu messen, durchlief die Fakultät als eine der wenigen deutschen Fakultäten 2011 erstmals erfolgreich die Akkreditierung nach AACSB (Association to Advance Collegiate Schools of Business). Neben der erneuten Akkreditierung im Jahr 2016 verbesserten die Aachener Wirtschaftswissenschaften stetig ihre Positionierung in nationalen wie internationalen Rankings.





# Die nächste Ausgabe 1/2017

## Profilbereich

### Computational Science & Engineering

Strömende Bits und Bytes:  
Zusammenspiel von Hochleistungsrechnen und Medizin

Vorhersage der Entwicklung von chronischen Erkrankungen:  
„Big Data“ in der Modellierung komplexer Systeme vom  
Molekül bis zum Patienten

Mathematische Optimierung hilft der Simulation bei  
der ökonomischen Bewertung von Zukunftsszenarien

Simulationen in Echtzeit:  
Von Optimierung bis zur Datenassimilation

Mehrskalen-Modellierung in der Festkörpermechanik –  
von der Mikroskala zur Blackbox

## Impressum

Herausgegeben im Auftrag des Rektors  
der RWTH Aachen  
Dezernat 3.0 - Presse und Kommunikation  
Templergraben 55  
52056 Aachen  
Telefon +49 241 80 - 93687  
pressestelle@rwth-aachen.de  
**www.rwth-aachen.de**

Redaktionsleitung:  
Angelika Hamacher  
Renate Kinny

Redaktionelle Mitarbeit:  
Rauke Xenia Bornefeld  
Nora Tretau

Foto Titelbild:  
Peter Winandy

Anzeigen:  
print'n'press, Aachen  
jh@p-n-p.de

Anzeigenberatung:  
Liz Rüster – Telefon +49 6132 43 44 38  
liz.rueter@web.de

Gestaltung:  
Kerstin Lünenschloß, Aachen

Druck:  
Vereinte Druckwerke, Neuss

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Das Wissenschaftsmagazin  
RWTH THEMEN erscheint einmal  
pro Semester.

Nachdruck einzelner Artikel, auch auszugs-  
weise, nur mit Genehmigung der Redaktion.  
Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren  
verantwortlich.

Wintersemester 2016/2017  
ISSN-Nummer 0179-079X

# Theoretisch

ist die Energiewende  
eine Jahrhundert-  
aufgabe.

# Praktisch

ist sie unser  
täglicher Job.

**Madeleine Unger**, Projektleiterin Windenergie Onshore  
**Carsten Wunsch**, Bauingenieur, Ausbau Windkraftanlagen

Gemeinsam bringen wir die Dinge voran: Wir von der EnBW entwickeln intelligente Energieprodukte, machen unsere Städte nachhaltiger und setzen uns für den Ausbau erneuerbarer Energien ein. Und dafür benötigen wir tatkräftige Unterstützung.

Deshalb suchen wir echte Macherinnen und Macher, die mit viel Engagement, Einfallsreichtum und Know-how mutig die Herausforderungen unserer Zeit anpacken und mit uns zusammen die Energiezukunft gestalten.

Im Gegenzug bieten wir abwechslungsreiche Aufgaben und vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten.

Machen Sie jetzt mit: [www.enbw.com/karriere](http://www.enbw.com/karriere)



**Wir machen das schon.**





# Alter ist einfach.



**Wenn man sich mit der  
passenden Vorsorgestrategie  
auch bei niedrigen Zinsen  
auf die Zukunft freuen kann.**

**Sprechen Sie mit uns.**