

Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Daniel Goldmann

# Recycling und Rohstoffe

Band 5

**K**

# Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie AKR e.V.

## – Interdisziplinäre Entwicklung und nachhaltige Problemlösungen im Forschungs- und Entwicklungsbereich der Ressourcentechnologie –

Bernd Friedrich und Kilian Gisbertz

1.	Ziele und Struktur.....	262
2.	Beispielhafte Forschungsfelder ausgewählter Experten im AKR .....	264
2.1.	Georessourcentechnik .....	264
2.2.	Bergbautechnik .....	266
2.2.1.	Untertägige Rohstoffgewinnung .....	266
2.2.2.	Kombination der Untertagevergasung (UTV) mit der CCS-Technologie .....	267
2.2.3.	Übertägige Rohstoffgewinnung und Bohrtechnik .....	267
2.2.4.	GMES4Mining – Geoservices für Bergbauprojekte .....	269
2.3.	Sortierung und Aufbereitung .....	270
2.3.1.	Sensorsortierung von Erzen .....	270
2.3.2.	Sensorgestützte Sortierung zur Schließung von Wertstoffkreisläufen .....	271
2.4.	Herstellung biogener Kohlenstoffträger für metallurgische Prozesse.....	272
2.5.	Berg-, Umwelt- und Europarecht.....	274
2.6.	Metallurgie und Werkstofftechnik.....	274
2.6.1.	Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der NE-Metalle.....	274
2.6.2.	GreenEAF-Stahlproduktion .....	276
2.6.3.	Werkstofftechnik von Eisen und Stahl .....	277
2.6.4.	Gießereitechnik .....	278
2.7.	Systemintegration durch Prozessleittechnik.....	279
3.	Zusammenfassung .....	280

Bei der Herstellung von Werkstoffen aus natürlichen oder anthropogenen Rohstoffen tritt die Frage nach der Ressourcen- und Energieeffizienz der Herstellungsschritte zunehmend in den Mittelpunkt. Um Lösungsansätze auf solche komplexen Fragestellungen nach einem interdisziplinären Ansatz zu entwickeln, wurde der gemeinnützige Verein *Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie – AKR e.V.* als zentrale Anlaufstelle der RWTH Aachen University ins Leben gerufen. Der Verein wird von über zwanzig Professuren der RWTH Aachen getragen, die sowohl technisches Wissen als auch fachliches Know-how

aus den Bereichen Rohstoffrecht und Rohstoffwirtschaft einbringen. Mit Zugriff auf über 20 Professor(inn)en und annähernd 300 wissenschaftlichen Mitarbeiter(innen) ist das Aachener Kompetenzzentrum aktuell das größte seiner Art. Die Vereinsstruktur ermöglicht die schnelle und unkomplizierte Initiierung und Koordination von Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie, bezweckt u.a. durch die Einrichtung eines industriellen Beirates eine noch intensivere Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis und erhöht die Sichtbarkeit der Forschungskompetenz der Aachener Experten.

## 1. Ziele und Struktur

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 dieser Problemlösungen erfordert deshalb sowohl eine enge Zusammenarbeit von Hochschuleinrichtungen untereinander als auch beständige Kooperationen mit Wirtschaftsunternehmen und politischen Institutionen.

Der Weg von der Erschließung nicht erneuerbarer Ressourcen beziehungsweise der Nutzbarmachung erneuerbarer Ressourcen bis hin zur Wiederverwertung von sogenannten *end-of-life*-Produkten verläuft entlang einer Prozesskette, die diverse Disziplinen wie Bergbau, untertägiger Ingenieurbau, Metallurgie und Metallrecycling sowie Rohstoff-, Material- und Umwelttechnik einbindet. Alleine an der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der RWTH Aachen University ist dem Themenfeld der Ressourcentechnologie eine Vielzahl an Professuren und Promoventen, aber auch Studiengängen zuzuordnen. Insgesamt stellt die Fakultät mit knapp 27 Millionen Euro Drittmitteln, 600 Beschäftigten und 3.500 Studierenden sowie 900 Neuanfängern pro Jahr eine wesentliche Säule der Universität dar. Die 43 Professuren organisieren sich in den Fachgruppen GuG (Geowissenschaften und Geographie), FRE (Rohstoffe und Entsorgungstechnik) sowie MuW (Metallurgie und Werkstofftechnik).

Um die Initiierung und Koordination von integrierten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zwischen Industrieunternehmen und Hochschuleinrichtungen zu erleichtern, haben sich über zwanzig Professoren und Professorinnen der RWTH in dem gemeinnützigen Verein *Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie – AKR e.V.* zusammengeschlossen. Dieser verstärkt die Öffentlichkeitswirkung der Forschung auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie und bindet neben technischem auch fachliches Wissen aus den Bereichen Rohstoffrecht und Rohstoffwirtschaft ein.

Das Ziel, die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie zu fördern sowie den technisch-wissenschaftlichen Fortschritt voranzutreiben, zeigt sich durch die Einrichtung eines industriellen Beirates. Ein Fokus bei der Zielsetzung des Vereins ist beispielsweise die Entwicklung und Begleitung grundlegender wie auch anwendungsbetonter Modellprojekte mit hohem Neuerungscharakter und Demonstrationswert wie z.B. von sogenannten *zero-waste* Prozessen. Eine Stärke des Aachener Kompetenzzentrums ist, dass es auf vielfältige Netzwerke zwischen Instituten und Industriepartnern samt der damit verbundenen Infrastruktur zurückgreift. Die Vereinsinstitution ermöglicht den Industrieunternehmen den schnellen und unkomplizierten Start

von Forschungs- und Entwicklungsprojekten, die im normalen Industriebetrieb aufgrund ihrer Kosten- und Planungsstruktur nicht durchführbar sind. Solche gemeinschaftlichen Vorhaben haben nicht nur einen wirtschaftlichen Nutzen, sondern ergänzen in der Regel auch die strategische Ausrichtung der Unternehmen sowie der Institute.

Als herausragende Beispiele für interdisziplinäre Großprojekte am Aachener Kompetenzzentrum ist zum einen der Sonderforschungsbereich *Stoffströme* und zum anderen der von Siemens eingerichtete Forschungsbereich *Rare Earth – Green Mining and Separation* zu nennen, in dem beispielhaft Institute der Lagerstättenkunde, des Bergbaus, der Aufbereitung und

der Metallurgie in Vier-Jahres-Programmen kooperieren. Im AKR liegen Kernkompetenzen auf den Themengebieten Rohstoffgewinnung, Rohstoffverfahrenstechnik, primäre und sekundäre Metallherstellung sowie die Überführung zu Werkstoffen mit anschließender Qualitätsprüfung vor.

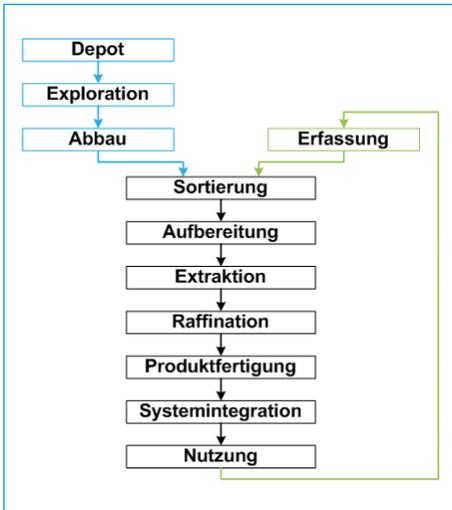


Bild 1: Vereinfachtes Fließbild der Ressourcenbehandlung

Da bei der Herstellung von Werkstoffen aus natürlichen oder anthropogenen Rohstoffen die Frage nach der Ressourcen- und Energieeffizienz der Herstellungsschritte zunehmend in den Mittelpunkt rückt, ist zur Veranschaulichung dieser Prozessschritte in Bild 1 ein vereinfachtes Flussdiagramm dargestellt. Eine der zentralen wissenschaftlichen Fragestellungen ist die der technoökonomisch sinnvollen Aufbereitungstiefe, also die Schnittstelle zur Metallgewinnung mittels Extraktion und Raffination. Bild 2 skizziert dies schematisch und zeigt auf, dass je nach Einzel-Ressourceneinsatz für die beiden konsekutiven Prozessschritte ein Gesamt-Minimum besteht. Mehrere Institute des AKR haben es sich zum Ziel gesetzt, ein allgemein belastbares Modell zur Ermittlung derartiger Minima zu entwickeln, welches sowohl für geogene wie auch anthropogene Rohstoffe sinnvolle Ergebnisse liefert.

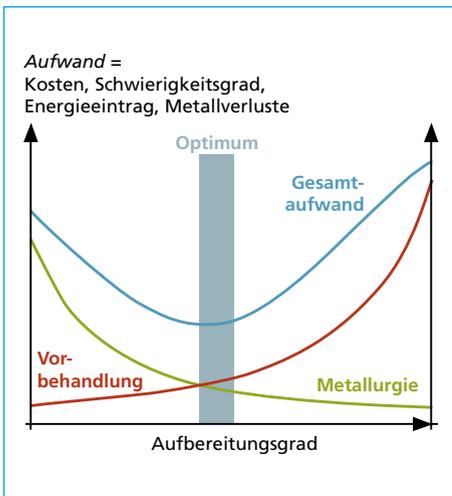


Bild 2: Metallurgischer Aufwand im Verhältnis zur Aufbereitungstiefe

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Ressourcentechnologie werden im nachfolgenden Kapitel die ausgewählten Forschungsfelder der Aachener Experten vorgestellt. Darüber hinaus wird vereinzelt auch auf rechtliche Aspekte der Ressourcentechnologie eingegangen. Das AKR-Cluster lässt sich schließlich durch die Kompetenzfelder in Bild 3 grob strukturieren.



Bild 3:

Inhaltliche Struktur des Aachener Kompetenzzentrums für Ressourcentechnologie

## 2. Beispielhafte Forschungsfelder ausgewählter Experten im AKR

### 2.1. Georessourcentechnik

Eine Kernkompetenz des AKR ist das Georessourcenmanagement, welches in der Arbeitsgruppe EMR (Energy & Mineral Resources) institutsübergreifend behandelt wird. Hiermit werden Themenbereiche um den globale Energieverbrauch und damit assoziierte Effizienzmaßnahmen ebenso wie das generelle Wachstum in der Rohstoffnachfrage für high-tech Informations- und Kommunikationsprodukte sowie der Bereich der Mobilität abgedeckt. Im Vordergrund steht die Prozessforschung mit rohstofforientierten Schwerpunkten wie Entstehung von Lagerstätten metallischer und nichtmetallischer Erze und fossiler Energieträger (Erdöl, Erdgas, Schiefer- und Flözgas, Kohle) sowie die verantwortliche Speicherung im Untergrund. Ebenso spielt die Entwicklung genetischer Modelle und Explorationskonzepte sowie die technisch-ökonomische und ökologische Bewertung des Nutzungs- und Risikopotenzials der Rohstoffe eine bedeutende Rolle. Die integrierte Rohstoffforschung umfasst alle geologischen Parameter, die die Bildung und Erhaltung von Energie- und Erzressourcen kontrollieren. Das Forschungsspektrum beinhaltet methodisch prozessorientierte Untersuchungen von der Diagenese bis zur Metamorphose, vom Fluid gebundenen Stofftransport und der Stofftrennung bis zur Gesteinsdeformation in Gegenwart von Fluiden, Laborsimulationen mit skalierten physikalischen Modellen, numerischen Simulationen von Fluidfluss, Deformations- und Transportprozessen sowie sedimentären Prozessen.

Das Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre als assoziiertes Institut der EMR-Gruppe legt beispielsweise seinen wissenschaftliche Schwerpunkt auf die Erforschung von Bildungsbedingungen, Eigenschaften und mineralogischem Inventar sowie der Nutzungs- und Umweltrelevanz von Lagerstätten der metallischen und nichtmetallischen mineralischen Rohstoffe. Diese Thematik besetzt ein interdisziplinäres Feld der Angewandten

Geowissenschaften und verknüpft die relevanten Disziplinen der Geochemie, Mineralogie, Petrographie und Tektonik. Das angewandte Methodenspektrum umfasst die lithologische und strukturelle Aufnahme von Erzkörpern und ihres geologischen Rahmens, petrographisch-mineralogische Bestandsaufnahmen und genetische Interpretation, Fluideinschlussanalytik, sowie die Litho- und Isotopengeochemie. Die wichtigsten lagerstättengenetischen Projekte der letzten Jahre umfassen Orogene Gold-, Eisenoxid-Kupfer-Gold, Vulkanogene Massivsulfiderz- und Porphyrische Kupfer-Gold-Lagerstätten in Simbabwe, Äthiopien, Russland, Indien, Südafrika, Namibia, Mauretanien, Iran, Indonesien, China und Oman. Ein weiteres Forschungsfeld beschäftigt sich mit dem Vorkommen und der Geometallurgie der Hochtechnologiemetalle Tantal, Niob, Indium, Tellur und den Seltenen Erden in Pegmatiten, Karbonatiten und Buntmetallsulfiderzen. In dem angeschlossenen Labor für Geochemie und Umweltanalytik werden u.A. Metallbelastungen, bzw. das geochemische Verhalten geogener und anthropogener Metallspezies an Bergbau- und Industriestandorten untersucht.

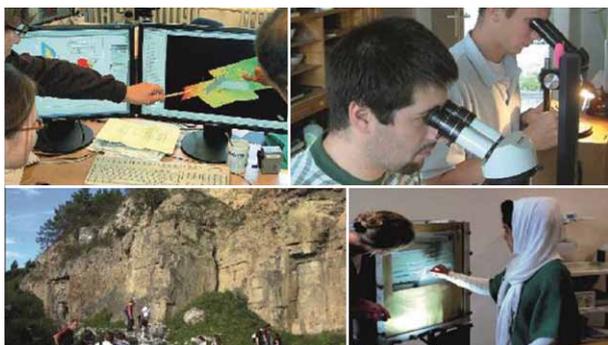


Bild 4:

Forschung zum Georessourcenmanagement



Bild 5:

Seltenerdhaltige Pegmatitlagerstätte in der Borborema-Provinz, Brasilien

Magmatisch-hydrothermale Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten zeichnen sich dadurch aus, dass sie Eisenoxide wie Magnetit bzw. Hämatit mit geringen Ti-Gehalten führen. Ihre wirtschaftliche Bedeutung liegt darin, dass neben Cu und Au auch Seltene Erdelemente, Co, Bi und U auftreten können. Mit unseren Arbeiten an der Lagerstätte Guelb Moghreïn

in Mauretania konnten wir nachweisen, dass die Verbindung von Au mit flüssigem Bi-Metall auch in sehr verdünnten hydrothermalen Lösungen bei Temperaturen über 350 °C zu einer effizienten Goldmineralisation führt. In der IOCG Lagerstätte Lalachang, Sichuan, wurde neben der Kupfermineralisation eine überprägende Vererzung mit Mineralen der Seltenen Erden festgestellt.

Orogene Lagerstätten sind ein wichtiger Bestandteil für die Gewinnung von Gold, Silber und Buntmetallen. So stellen z.B. die Lode-Goldlagerstätten archaischer Kratone einen Großteil der Goldreserven der Erde dar. Strukturelle und hydrothermale Prozesse, die die Lagerstättenbildung kontrollieren sind traditionell Gegenstand mineralogischer, geochemischer und numerischer Bearbeitungen durch das Institut. Dabei wurden und werden Vorkommen in Afrika, Indien, Grönland sowie Russland bearbeitet. In der Lagerstätte Hutti, Indien, konnte erstmals gezeigt werden, dass die wirtschaftliche Goldmineralisation durch zwei zeitlich und stofflich unabhängige Hydrothermalereignisse gebildet wurde.

Die Bildung von fossilen (Oman) und rezenten (Rotes Meer) Buntmetallagerstätten am Meeresboden stellt einen integralen Bestandteil der Lagerstättenforschung dar, da diese Lagerstätten eine der Hauptlieferanten von Zink und Kupfer sowie anderer wichtiger Beiprodukte darstellt.

## 2.2. Bergbautechnik

### 2.2.1. Untertägige Rohstoffgewinnung

Prozesse zur untertägigen Gewinnung mineralischer Rohstoffe zur Deckung des weltweit wachsenden Energie- und Rohstoffbedarfs sind eine Kernkompetenz des Instituts für Bergbaukunde I. Das Gebiet der Rohstoffgewinnung umfasst dabei alle Vorgänge, die erforderlich sind, um mineralische Rohstoffe aus der Erdkruste zu extrahieren und sie einer weiteren Verarbeitung zuzuführen. Die Schwerpunkte der aktuellen Forschungstätigkeiten liegen neben der Erstellung von Machbarkeitsstudien insbesondere in den Bereichen Erschließung von Lagerstätten, Abbauplanung, Wassertechnik und Prozessoptimierung.

Vor dem Hintergrund der Orientierung wirtschaftlicher Tätigkeiten an dem Leitbild Nachhaltiger Entwicklung nimmt der Rohstoffsektor eine bedeutende Stellung ein – die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen ist vor allem mit teilweise gravierenden Eingriffen in bestehende Ökosysteme verbunden. Die Sicherstellung der Versorgung mit Energie und Rohstoffen und ihre umweltschonende und rationelle Nutzung sind wesentliche Voraussetzungen für wirtschaftliche Entwicklung und Wohlstand.

Die aktuelle Forschungstätigkeit umfasst neben dem konzeptionellen Bereich der Erarbeitung von Nachhaltigkeitsindikatorenssystemen verschiedene Projekte im Bereich Sanierung und Nachfolgenutzung von Bergbaustandorten sowie Untersuchungen zur Carbon Capture and Storage-Technologie (CCS) unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit.

Angesichts weiterhin wachsender Nachfrage und steigender Preise bei gestiegenen Anforderungen an die ökologische und soziale Verträglichkeit von Rohstoffprojekten muss sich die Rohstoffindustrie neuen Herausforderungen stellen. Im Vordergrund der Projektarbeit stehen verschiedene Aspekte der nationalen und internationalen Rohstoffwirtschaft, z.B. bei der Erstellung von Marktstudien.

Arbeits- und Gesundheitsschutz spielt nicht nur in der Rohstoffwirtschaft, sondern branchenübergreifend eine zunehmende Rolle. Besonders hohe Anforderungen an den Schutz der Mitarbeiter werden bei der Sanierung von Altlasten gestellt. Daher arbeitet das BBK I gemeinsam mit Partnern aus der Wirtschaft bereits seit mehreren Jahren an unterschiedlichen Projekten, z.B. im Bereich der Asbestsanierung, bei denen neuartige Verfahren zum Schutz der Mitarbeiter erforscht werden.

### 2.2.2. Kombination der Untertagevergasung (UTV) mit der CCS-Technologie

Die kontinuierliche Abnahme der Kohleförderung und der angestrebte Ausstieg aus dem deutschen Steinkohlenbergbau unterstreichen die Bedeutung der möglichen Nutzung von derzeit nicht abbauwürdigen Kohleflözen in Deutschland und weltweit. Hierbei kann ein Nutzungskonzept, das die Reduzierung von Treibhausgasemissionen mit einer wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Energieerzeugung verbindet, wesentliche Vorteile bieten.

Eine intensive Studie im Hinblick auf aktuelle Untertagevergasungstechniken sowie die Ausarbeitung und Bewertung einer realisierbaren UTV-CCS-Technologie (Bild 6) bezüglich der wirtschaftlichen Effizienz und möglicher Umweltwechselwirkungen bilden den ersten Teil des Projektes. Darauf aufbauend wird die Umweltverträglichkeit der kontrollierten Anwendung dieser Technologie auf der Grundlage von international verfügbaren Daten anhand von Simulationen untersucht. Die Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung und Untersuchung eines Niedrigemissions-Kraftwerkes, basierend auf der Nutzung von synthetisch hergestelltem Gas und einer anschließenden  $\text{CO}_2$ -Speicherung in den resultierenden Überresten der in-situ umgewandelten Kohleflöze. Hierbei werden insbesondere Wirtschafts- und Umweltaspekte dieser noch zu entwickelnden Methode erforscht und bewertet.

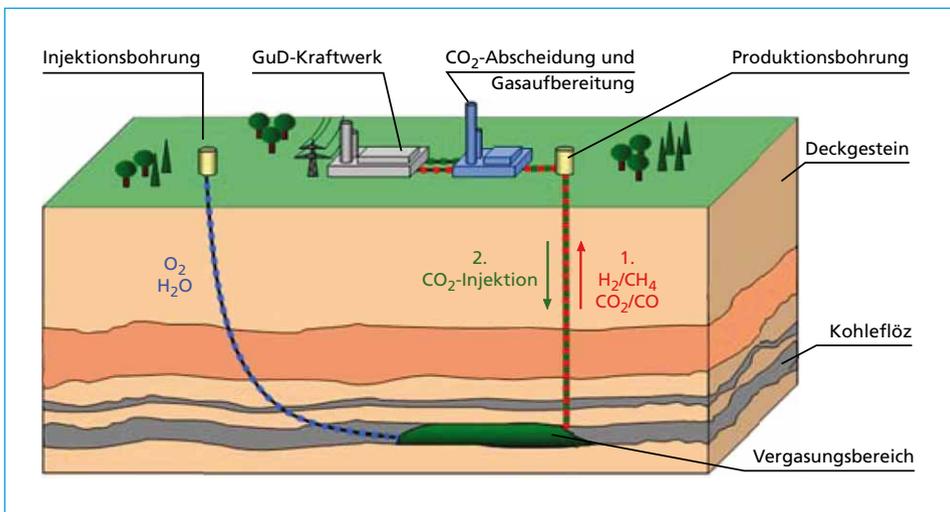


Bild 6: UTV-CCS-Technologie

### 2.2.3. Übertägige Rohstoffgewinnung und Bohrtechnik

Die Rohstoffgewinnung übertage in Deutschland betrifft in erster Linie die Gewinnung von Braunkohle und Rohstoffen aus dem Bereich der Steine und Erden. Die jährlichen Produktionsmengen liegen bei der Braunkohle bei rund 180 Millionen Tonnen mit etwa 23.000 Beschäftigten. Die entsprechenden Zahlen für den Bereich der Steine und Erden differieren zwischen den einzelnen Statistiken stark. Von der Größenordnung her, kann man davon ausgehen, dass die jährliche Produktion dieser Rohstoffe oberhalb von 600 Millionen Tonnen liegen dürfte und mehr als 50.000 Beschäftigte dort tätig sind.

Der Energieverbrauch in dieser Branche ist bezogen auf den jeweiligen Bruttoproduktionswert sehr hoch. Laut einer Erhebung des statistischen Bundesamtes von 2008 liegt die Kohlegewinnung mit einem Wert von 5,9 % (inklusive Steinkohle) noch hinter der Papierindustrie (6,5 %) und der Glasindustrie (6,7 %), während die Gewinnung von Steine und Erden-Rohstoffen mit einem Energieverbrauch von 9 % das energieintensivste produzierende Gewerbe ist.

Trotz der technischen Weiterentwicklung hin zu energiesparenden Antrieben benötigt die Rohstoffgewinnung übertage nach wie vor erhebliche Mengen an Energie. Betrachtet man allein den Bereich der Festgesteine, so ergibt sich eine jährliche Fördermenge von etwa 300 Millionen Tonnen. Diese Massen werden in der Regel aus dem Gewinnungsbereich zur ersten Aufbereitungsstufe durch dieselmotorisch betriebene Betriebsmittel transportiert. Für den hierzu benötigten Kraftstoffverbrauch ergeben sich Werte von bis zu einem Liter Kraftstoff je Tonne Rohstoff. Wird ein mittlerer Wert von 0,5 Liter je Tonne unterstellt ergibt sich ein jährlicher Verbrauch in diesem Industriezweig von 125.000 Tonnen Kraftstoff.



Bild 7:

Rohstoffgewinnung über Tage

Die diesem Prozess nachgeschalteten Aufbereitungsanlagen benötigen erhebliche Mengen an elektrischer Energie. Es ist davon auszugehen, dass der spezifische Energieverbrauch hier bei etwa 2,5 bis 3,0 kWh je Tonne Rohstoff liegt. Dies entspricht einem jährlichen Energieverbrauch von 200.000 Vier-Personenhaushalten.

Nimmt man zusätzlich die Betriebe in denen Lockergesteine wie bspw. Kiese und Sande gewonnen werden hinzu, ergibt sich ein erheblicher Mehrverbrauch an Energie.

Eine Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs ist hinsichtlich der Minderung der Freisetzung klimaschädlicher Gase und der Schonung der Reserven fossiler Energieträger wünschenswert. Dadurch kann ein Beitrag zur Erreichung der klimapolitischen Ziele bei gleichzeitigen wirtschaftlichen Vorteilen für die Tagebaubetreiber geleistet werden. Das Identifizieren möglicher Einsparpotentiale in ihrer Qualität und möglicher Substitution ist die Grundlage einer sinnvollen Optimierung und stellt die Basis derzeitiger Forschungsarbeiten dar. Dabei wird bewusst ein Schwerpunkt auf Bereiche gelegt, die nicht von vorn herein im Fokus stehen, wenn der Energieverbrauch thematisiert wird. Zentrale Aufgabe ist es zu ermitteln wo das theoretische Optimum bezüglich des Energieverbrauches eines Tagebaus liegen könnte. Nur dadurch kann erkannt werden, wie groß das jeweilige Optimierungspotential ist.

## 2.2.4. GMES4Mining – Geoservices für Bergbauprojekte

Im Rahmen des Verbundprojektes GMES4Mining (GMES Global Monitoring for Environment and Security – Offizielles Europäisches Programm zur Einrichtung einer Europäischen Erdbeobachtungs-Infrastruktur) werden unter Nutzung der von Fernerkundungs- sowie In-situ-Sensoren gewonnenen Daten innovative multisensorale Analyseverfahren und Geoinformationstechnologien entwickelt und zu technologieübergreifenden Geoservices für Bergbauprojekte gebündelt. Dies soll die Erkennung und Überwachung von Oberflächeneigenschaften und Bodenbewegungen, d.h. die Prozesse in der Lagerstättenaufsuchung sowie im Monitoring für Umweltschutz und Betriebssicherheit unterstützen. Hierzu bringt innerhalb des AKR das Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau seine Kernkompetenzen ein (Bild 8).

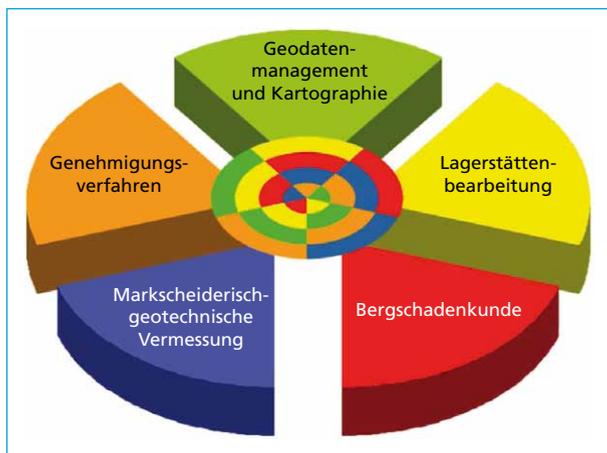


Bild 8:

Kernkompetenzen des Markscheidewesens

Der Lebenszyklus eines Bergbauvorhabens kann mit den Hauptphasen Exploration/Erkundung – Aufschluss/Bau – Betrieb – Stilllegung/Verwahrung beschrieben werden. Während im EU-Raum (auch in NRW) neue Bergbauvorhaben eher selten sind und hier Bergbauvorhaben sich hauptsächlich in den Phasen Betrieb, bzw. Stilllegung/Verwahrung befinden, gibt es weltweit eine Vielzahl von neuen Bergbauvorhaben mit erheblichem Explorationsbedarf. Dabei beeinflusst jedes Bergbauvorhaben zwangsläufig die Umwelt. Daher ist in allen Phasen eines Bergbauvorhabens ein großes Augenmerk auf die Umweltschonung zu legen. Während dies bei Bergbauvorhaben im EU-Raum, insbesondere also auch in NRW, durch moderne geeignete rechtliche Regelungen und effektive behördliche Aufsicht sichergestellt ist, kommt der Umweltschonung in anderen Ländern erst nach und nach eine angemessene Bedeutung zu. In jedem Fall werden zur Dokumentation und Überwachung der bergbaulichen Aktivitäten in allen Phasen vielfältige Daten mit Raumbezug benötigt.

Dabei ist bereits heute die Nutzung sowohl von bodengestützten Datenerfassungsverfahren als auch von operationell verfügbaren Fernerkundungsdaten Stand der Technik. In den vergangenen zwei Jahren haben jedoch vielversprechende neue Messsysteme einen Entwicklungsstand erreicht, welcher ihre Eignung im Hinblick auf bergbauliche Fragestellungen in Aussicht stellt. Bisher fehlen allerdings weitgehend integrierte Nutzungs- und Auswertansätze. Deshalb steht bei GMES4Mining die Entwicklung neuer multisensoraler Analyseverfahren im Vordergrund. Dies ist einerseits die Kombination luft- oder satellitengestützter quasi-kontinuierlicher Spektren sowie multitemporaler Betrachtungen und auch terrestrischer geophysikalischer und geologischer Datenerhebungen zur qualitativ

hochwertigen Bestimmung von Ökosystemparametern und verbesserter Modellierung von geosphärischen Prozessen. Andererseits geht es um die integrierte Erfassung von bergbaubedingten Bodenbewegungen aus den Daten moderner Radarsatelliten, Ergebnissen geodätischer, zunehmend kontinuierlich messender Verfahren und den sehr neuen bisher nicht ausreichend erschlossenen Möglichkeiten zur bergbaulichen Nutzung der bodengestützten Radarinterferometrie. Und schließlich ist auch die Integration aller Daten zu einem Gesamtsystem von enormer Bedeutung, um die Auswirkungen bergbaulicher Vorhaben besser und genauer dokumentieren zu können.

## 2.3. Sortierung und Aufbereitung

### 2.3.1. Sensorsortierung von Erzen

Die Spremberger Kupferschiefer Lagerstätte ist Bestandteil des mitteleuropäischen Kupferschiefergürtels und setzt sich aus den für ihn typischen Erzhorizonten Sandsteinerz, Kupferschiefer und Dolomiterz zusammen. Die drei Horizonte weisen unterschiedliche Kupfergehalte von 0,2 % Cu bis zu stellenweise 8 % Cu auf. Ein getrennter Abbau der teilweise nur 0,3 bis 0,5 m mächtigen Erzhorizonte ist nicht möglich. Die drei Erzhorizonte sind durch die unterschiedliche Mineralogie und Feinheit der Erzminerale sowie die unterschiedliche Zusammensetzung des Nebengesteins charakterisiert und lassen sich unterschiedlich gut aufbereiten. In der konventionellen mineralischen Aufbereitung durchläuft das gesamte Erz eine Grobzerkleinerung, gefolgt von einer Feinmahlung mit anschließender Flotation.

Zahlreiche Studien belegen, dass sich mittels einer getrennten Flotation der Erztypen die besten Ergebnisse hinsichtlich Ausbringen und Konzentratgehalt erzielen lassen, da dadurch sowohl die Mahlfeinheit als auch die Reagenziendosierung optimal angepasst werden können. Besonders problematisch erweist sich hier der mit bis zu 12 % sehr hohe Gehalt des Kupferschieferhorizonts an organischem Kohlenstoff. Demgegenüber lässt sich der grob verwachsene vererzte Sandstein mit geringem Mahlaufwand und ausgezeichneten Ergebnissen hinsichtlich Wertstoffausbringen und Konzentratgehalt flotieren. Das aus dem Sandstein separat gewonnene reiche Konzentrat (etwa 40 % Cu) wird danach mit dem Konzentrat aus der Flotation von Kupferschiefer und Dolomit gemischt und dadurch erst lässt sich der für eine Vermarktung notwendige Kupfergehalt im Konzentrat (etwa 25 % Cu) realisieren.

Aufgabenstellung für das Forschungsprojekt war die Abtrennung eines möglichst reinen, kohlenstoffarmen Sandsteinprodukts aus dem Roherz mittels sensorgestützter Sortierung zur Aufgabe in eine getrennte Flotationslinie. Da die aus Bohrkernen zur Verfügung stehende Menge an Probematerial aus der Spremberger Lagerstätte begrenzt war, wurden die Sortierversuche teilweise mit Kupferschiefererzen der Lagerstätten Rudna und Polkowice durchgeführt. Diese polnischen Lagerstätten sind im Hinblick auf Vererzung und Kupfergehalt ähnlich bis identisch mit der Spremberger Lagerstätte. Es wurden optische Farbkameras, Röntgenfluoreszenz- und Nahinfrarot-Sensoren untersucht, wobei die besten Ergebnisse mit Nahinfrarot-Sensoren erzielt werden konnten. Bild 9 zeigt die Nahinfrarot-Absorptionskurven für Sandsteinerz, Dolomiterz und Kupferschiefer.

In der zweiten Versuchsphase wurden die Voruntersuchungen durch einen Durchsatzversuch im Pilotanlagenmaßstab verifiziert. Durch einen einzigen Sortierschritt konnte ein Sandsteinprodukt mit weniger als 0,2 % organischem Kohlenstoff erzeugt werden. Die Sandsteinverluste in der Kupferschiefer/Dolomit Fraktion betragen weniger als 1 %. Mehr als 98 % des problematischen Kohlenstoffs konnten in der Kupferschiefer/Dolomit-Fraktion konzentriert werden, deren Flotation mittels spezieller Drückerreagenzien auf diese Besonderheit angepasst werden können.

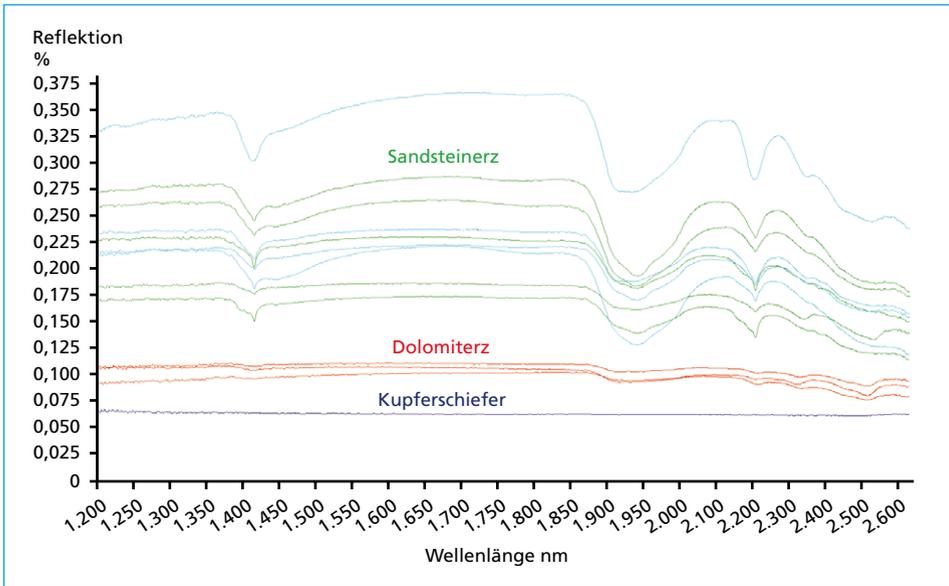


Bild 9: Nahinfrarot-Absorptionskurven für Sandsteinerz, Dolomiterz und Kupferschiefer, Absorptionskurven sind baseline-korrigiert und auf der y-Skala verschoben

### 2.3.2. Sensorgestützte Sortierung zur Schließung von Wertstoffkreisläufen

Der Forschungsbereich *Recycling* beginnt an der Rohstoffquelle, der anthropogenen Ressource *Abfall*. Die Initiative dafür resultiert zumeist aus Quoten, die der Gesetzgeber für die Verwertung definiert, in wenigen Fällen aber auch allein aus wirtschaftlicher Motivation. Metallische Abfälle, und hier insbesondere Nicht-Eisen-Metalle (NE-Metalle), sind als Ressource sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Gesichtspunkten besonders interessant. Ein Schwerpunkt der Forschung des Instituts für Aufbereitung und Recycling (I.A.R.) konzentriert sich auf die Ressourcen, die in heterogenen Abfallgemischen wie Siedlungsabfall, gewerblichem Mischabfall oder Rückständen der Abfallverbrennung enthalten sind. Hierbei sind die zentralen Forschungsbereiche des Instituts die Verfahrenstechnik für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe, die mechanische und biologische Abfallbehandlung, die Simulation und Bewertung von Aufbereitungsprozessen sowie die sensorgestützte Sortierung.

In Deutschland wird etwa ein Drittel des Hausmülls einer mechanischen bzw. mechanisch-biologischen Behandlung unterzogen. Dabei kann ein NE-Metall-Vorkonzentrat aus dem Abfallstrom gewonnen werden. Die mechanische Anreicherung von NE-Metallen erfolgt mit Wirbelstromscheidern und führt zu stark verschmutzten Vorkonzentraten mit Metallgehalten von 30 bis 70 Ma.-%. Dieser Metallanteil besteht zu etwa 80 Ma.-% aus Aluminium, der Rest verteilt sich auf Kupfer, Messing, Zink, Edelstahl sowie in geringen Konzentrationen Silber.

Um die metallischen Ressourcen aus solchen *armen* Vorkonzentraten heben zu können, wurde gemeinsam mit der Fa. Mekon in Salzgitter ein Verfahren zur weiteren Aufkonzentrierung der Metalle und zur Sortentrennung entwickelt und erprobt. Um die Sortentrennung des NE-Metall-Vorkonzentrates ermöglichen zu können, ist es unabdingbar für eine gute Kornvereinzelung des Vorkonzentrates zu sorgen. Problematisch ist die geringe

Stückmasse der Körner, da Hochlohnländern nur mit großem technischen Aufwand eine wirtschaftliche Sortierung durchgeführt werden kann. Eine manuelle Sortierung, wie sie in Niedriglohnländern durchgeführt wird, gestaltet sich in Deutschland daher unwirtschaftlich.

In dem von der EU-Kommission geförderten Eco-Innovation Vorhaben SATURN (ECO/08/239051/SI2.534294) erfolgt eine automatisierte Sortierung unter Verwendung moderner Sensortechnologien. In unterschiedlichen Kombinationen lassen sich Röntgen-, Nah-Infrarot- und induktive Sensoren mit digitaler Bildverarbeitung kombinieren und erlauben so, aus dem NE-Metall-Vorkonzentrat sortenreine Konzentrate mit enger definierten Legierungseigenschaften zu erzeugen (Bild 10).



Bild 10: NE-Metall-Vorkonzentrat und die daraus erzeugten Konzentrate

## 2.4. Herstellung biogener Kohlenstoffträger für metallurgische Prozesse

Der Kupolofen ist ein metallurgisches Schmelzaggregat zur Herstellung von Gusseisen aus Roheisen. Kupolöfen sind typische Schachtöfen mit einer Höhe von bis zu 20 m. Neben Roheisen werden Stahlschrott, Kreislaufmetall und Gießereikoks in dem Kupolofen eingesetzt. Die Hauptaufgaben des Gießereikoks im Kupolofenprozess sind die Energiebereitstellung und insbesondere der Einsatz als Aufkohlungsmittel. Daher unterscheidet sich der Gießereikoks in der Stückgröße und in der Festigkeit vom Hochofenkoks.

Mit etwa 3,86 Millionen Tonnen Gusseisen und einem Jahresumsatz von etwa 6,7 Milliarden Euro war Deutschland im Jahr 2010 der größte Gusseisenproduzent Europas. Laut dem Bundesverband der deutschen Gießereiindustrie (BDG) betreiben etwa 85 von den 269 deutschen Gießereien Kupolöfen. Die deutsche Gießereiindustrie verbraucht jährlich etwa 450.000 Tonnen Gießereikoks, der seit 2004 zu 100 % importiert werden muss. Der Gießereikokspreis lag im Mai 2011 bei etwa 550 EUR/t. Die Nutzung des Gießereikoks während des Prozesses führt zu etwa 1,5 Millionen Tonnen an CO<sub>2</sub>-Emissionen. Daher werden die Betriebe nicht nur durch die hohen Preise für Gießereikoks sondern auch durch den CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel belastet.

Aufgrund der begrenzten Produktionskapazitäten für Gießereikoks und der Exportpolitik wichtiger Herkunftsländer ist kurz- bis mittelfristig keine Entspannung bei den Preisen in Sicht. Deshalb suchen die Betreiber von Kupolöfen nach alternativen Ressourcen. Ein vielversprechender alternativer Kohlenstoffträger für den Einsatz im Kupolofen können Biomassereststoffe sein, die durch thermo-chemische Konversionsverfahren wie der Pyrolyse in höherwertige Kohlenstoffprodukte überführt werden können. Durch den Einsatz von biogenen Einsatzstoffen können zudem fossile Ressourcen geschont werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER) werden Möglichkeiten zur Substitution von fossilen Kohlenstoffträgern (Gießereikoks und Blaskohle) im Kupolofen durch biogene Kohlen/Kokse untersucht (Bild 11). Versuche im Technikumsmaßstab konnten zeigen, dass verschiedene Biomassen (Stroh, Rinde, Grünschnitt, Altholz, Hackschnitzel, Nusschalen, usw.) durch Pyrolyse in Carbonisate mit erhöhten Kohlenstoffanteilen überführt werden können. Da Carbonisate aus der Biomassepyrolyse anders als Steinkohlen-Koks in einer unzureichenden Korngröße vorliegen, müssen die Carbonisate brikettiert werden, um Gießereikoks substituieren zu können.



Bild 11: Einsatzmöglichkeiten biogener Kohlenstoffträger am Beispiel des Kupolofenprozesses

Zurzeit wird eine Pilot-Drehrohrpyrolyseanlage aufgebaut, in der mehrere Tonnen an biogenen Kohlenstoffträgern erzeugt werden können. Die erzeugten Carbonisate sollen anschließend brikettiert, und in industriellen Schmelzversuchen erprobt werden. Dabei soll die Fragestellung im Vordergrund stehen, wie viel Prozent an fossilen Kohlenstoffträgern substituiert werden können. Neben dem Bereich der Einsatzmöglichkeiten von Biokoks/-kohle im Kupolofen sollen zukünftig auch andere metallurgische und werkstofftechnische Bereiche (Elektrolichtbogenofen, Gasbrenner in metallurgischen Prozessen, Rohsiliziumherstellung usw.) im Hinblick auf die Substitution von fossilen Ressourcen durch biogene Ressourcen am Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe erforscht werden.

## 2.5. Berg-, Umwelt- und Europarecht

Die Ressourcentechnologie ist immer eng verbunden mit dem Recht. Das betrifft zunächst die Gewinnung natürlicher Ressourcen. Diese wird allerdings heute nicht mehr nur vom klassischen Bergrecht geprägt, sondern auch vom Umwelt- und dabei insbesondere vom Habitatschutzrecht. Hier liegt der Schnittpunkt des Lehr- und Forschungsgebietes Berg-, Umwelt- und Europarecht. Verschiedene Projekte konnten inzwischen begleitet und mit Empfehlungen versehen werden. So wurde beispielsweise näher untersucht, inwieweit ein Habitatschutzgebiet für die Bechsteinfledermaus einem Kiesgewinnungsbetrieb entgegensteht oder welche Rechtsregeln für Kalihalden gelten. Ein wesentliches Forschungsfeld ist zudem die Rekultivierung und die Spätfolgenverantwortung im Gefolge von Bergbauprojekten, die Abfallentsorgung sowie das aktuelle Thema des Fracking.

Im Bereich der Ressourcennutzung wird das Anlagengenehmigungsrecht (einschließlich der Klagemöglichkeiten von Umweltverbänden nach dem EuGH-Urteil Trianel) erforscht und das zu immer höheren Kosten führende Emissionshandelsrecht. Damit ist zugleich die Brücke geschlagen zum Klimaschutzrecht. Dieses prägt in immer stärkerem Maße auch den Bau von Kraftwerken sowie die Förderung erneuerbarer Energien. Für Neubauten von Kohlekraftwerken stellt sich die Frage, inwieweit sie (auch ohne CCS) angesichts ehrgeiziger Reduktionsziele bis 2050 und Festlegungen in Klimaschutzgesetzen sowie Planungen heute noch genehmigt werden können. Rein rechtlich sollte dies nach eigener Recherche trotz des Urteils zum Kohlekraftwerk Datteln weiterhin möglich sein.

Bezogen auf die Rechtsgrundlagen erneuerbarer Energien entsteht gegenwärtig ein neues Forschungsfeld, welches sich mit dem dafür notwendigen Leitungsbau, den Grenzen aus dem Beihilfenverbot sowie der energetischen Gebäudesanierung beschäftigt.

Die Grundlage dieser verschiedenen Rechtsgebiete bildet vielfach das Europarecht. Es wirkt sich in verschiedenen Bereichen auf die Ressourcengewinnung und -verarbeitung aus, z.B. wenn es um die Wirkung von Richtlinien geht, so der CCS-Richtlinie, der Industrieemissions-Richtlinie (IED) und der Abfallrahmenrichtlinie. Die Erfahrungen des Lehr und Forschungsgebiets zum Europarecht sind in einem sechsbändigen Handbuch zusammengefasst, das den sich ständig ändernden Gesetzgebungen durch Neuauflage angepasst wird.

## 2.6. Metallurgie und Werkstofftechnik

### 2.6.1. Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der NE-Metalle

Die Recyclingmetallurgie am Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) wird mit Hilfe von Elektrolichtbogenöfen bis in den 1 MW-Bereich, eines Top Blown Rotary Converter (TBRC) (Bild 12) sowie verschiedenster Schmelz- und Raffinieröfen weiterentwickelt und optimiert. Verarbeitet werden beispielsweise aufbereitete Alt-Batterien, verbrauchte Katalysatoren, aber auch industrielle Reststoffe wie Stäube, Schlämme oder Schlacken. Durch intelligente Kombination verschiedener Abfälle, Reduktionsmittel und Hilfsstoffe soll in angepassten Prozessfensterbereichen die Ressourceneffizienz maximiert werden. Verschiedene hydrometallurgische Behandlungsverfahren ermöglichen ergänzend das selektive Herauslösen von Wert-Metallen z.B. aus metallurgischen Zwischenprodukten. Das Metall wird anschließend durch Kristallisation oder Elektrolyse gewonnen.

Angesichts des vermehrten Einsatzes von Li-Ion-Batterien an Stelle von NiCd- und NiMH-Batterien steigen neben den Absatzzahlen ebenfalls die Rücklaufmengen an Li-Ion-Batterien. Ein möglichst selektives Ausbringen der Bestandteile wird allerdings aufgrund ihrer Vielfalt erschwert. Eine Automobil Lithium-Ionen Batterie beinhaltet beispielsweise die Wertstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan, Kupfer und Aluminium.



Bild 12: Recyclingmetallurgie mit Demonstrationscharakter im TBRC

Im Rahmen mehrerer BMBF/BMWi/DBU/EU-Forschungsprojekte hat das IME gemeinsam mit industriellen Partnern ein Recyclingverfahren für Li-Ion-Batterien entwickelt. Ziel war ein ökonomischer und ökologischer Prozess, der den gesetzlichen Vorgaben genügt (Recyclingeffizienz > 50 %). Das Verfahren kombiniert verschiedene Aufbereitungstechniken sowie Vorteile der Pyro- und Hydrometallurgie. Im Unterschied zu bisherigen pyrometallurgischen Verfahren werden die Batterien vor dem Einschmelzen zerkleinert und die einzelnen Komponenten so voneinander getrennt, dass auch die Wiedergewinnung der unedlen Komponenten möglich ist. So fallen bereits vor dem Einschmelzen sehr reine Al- und Cu- sowie eine hochwertige Fe-Fraktion an. Hauptrecyclingprodukte sind eine im Elektroofen erschmolzene Co-Ni-Legierung sowie hoch reines Li-Karbonat, wofür sich unter anderem die Glasindustrie interessiert. Es kann auch als Ausgangsstoff für die Herstellung neuer Batterien eingesetzt werden. Die Co-Ni-Legierung eignet sich als Vorlegierung für Superlegierungen.

Parallel wurde an einem hydrometallurgischen Verfahrenskonzept gearbeitet, um *end-of-life* Li-Ion-Batterien zu recyceln. Die Wertmetalle Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer sowie Begleitelemente wie Mangan, Aluminium und Eisen werden durch Laugung in die Lösung extrahiert. Im Zementationsschritt wird Kupfer zurückgewonnen (Bild 13), so dass anschließend Aluminium und Eisen durch pH-Wert-Erhöhung ausgefällt werden. Darauf folgt die gemeinsame Ausfällung von Kobalt, Nickel und Mangan, welches für die Herstellung von neuem Kathodenmaterial zur Verfügung steht. Im letzten Schritt erfolgt die Kristallisation von Lithium Karbonat durch Eindampfen der Restlösung.



Bild 13:

Hydrometallurgische Versuche zum Li-Ion-Batterie-Recycling (links: Aufbau, rechts: Zementatkupfer)

Es besteht weiterer Optimierungsbedarf, um die Rückgewinnung wertvoller Metalle effizienter, ökonomischer und umweltfreundlicher zu gestalten.

## 2.6.2. GreenEAF-Stahlproduktion

Die direkten Emissionen der Stahlproduktion im Elektrolichtbogenofen (EAF) resultieren aus dem Eintrag von Kohlenstoff durch den Schrott, Ferro-Legierungen, und Schlackenbildnern sowie aus dem Elektrodenabbrand und dem Einsatz von Injektionskohle für das Schlackenschäumen. Darüber hinaus werden Erdgas und Kohle bzw. Koks eingesetzt, um den Eintrag chemischer Energie in den Ofen zu erhöhen. Dabei wird Kohle bzw. Koks als Satzkohle mit dem Korb in den Ofen chargiert. Der durchschnittliche spezifische Kohle- bzw. Koksverbrauch im EAF liegt laut Fachliteratur bei etwa 12 kg/t Stahl. Dies entspricht CO<sub>2</sub>-Emissionen von 43 kg CO<sub>2</sub>/t Stahl (Bild 14).

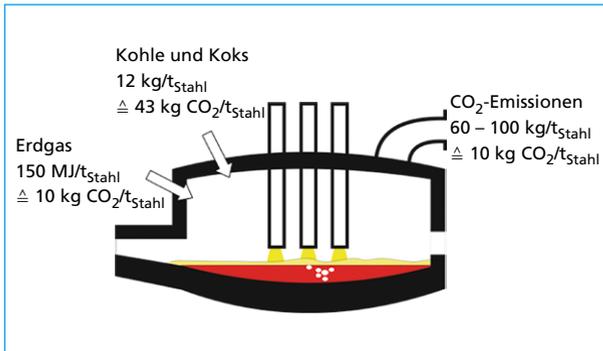


Bild 14:

Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen des Elektrolichtbogenofens und betrachtete Kohlenstoffeinträge

Für die deutsche Elektrostahlproduktion des Jahres 2010 von 13,2 Mt entsprechen diese spezifischen Verbrauchs- und Emissionswerte einem Kohle bzw. Koksverbrauch von etwa 160.000 Tonnen und daraus resultierenden Emissionen von etwa 570.000 Tonnen CO<sub>2</sub>. Setzt man diese Emissionen in das Verhältnis zu den direkten Emissionen des EAF, für die gemäß zweier Studien<sup>1</sup> ein Wert zwischen 60 bis 100 kg/t Stahl anzunehmen ist, so ergibt sich ein Anteil von über 40 bis 70 % an diesen Emissionen allein für den Einsatz von Kohle und Koks im EAF.

Das von der Europäischen Kommission im Rahmen des Research Fund for Coal and Steel geförderte Forschungsprojekt *Sustainable EAF steel production – GreenEAF* hat daher das Ziel, die teilweise bis vollständige Substitution von fossiler Kohle und Erdgas im EAF durch Biokohle und Biogas zu untersuchen. Biokohle und Biogas werden dabei durch Pyrolyse aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen hergestellt.

Das Forschungsprojekt deckt alle wichtigen Prozessstufen von der Verfügbarkeitsbetrachtung, der Herstellung mittels Pyrolyse über eine mechanische Aufbereitung bis zum Einsatz im Elektrolichtbogenofen ab. Die Biokohle wird hinsichtlich ihrer Eignung als Satzkohle sowie als Injektionskohle für die Schaumslagenerzeugung analysiert und erprobt. Für das Biogas ist eine Verwendung in Brennern des Elektrolichtbogenofens geplant und entsprechend wird auch diese untersucht. Die Eigenschaften von Biokohle und -gas und der zugrundeliegende Pyrolyseprozess sollen den Anforderungen für eine Verwendung im Elektrolichtbogenofen (möglichst optimal) angepasst werden.

<sup>1</sup> [http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/docs/bm\\_study-iron\\_and\\_steel\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/docs/bm_study-iron_and_steel_en.pdf) und <http://www.ecofys.com/files/files/developingbenchmarkingcriteriaforco2emissions.pdf>, Stand: 27.02.2012

Innerhalb des europäischen Konsortium, das aus drei Elektrostahlwerken, einem Anlagenbauer und drei Forschungsinstituten besteht, ist das Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) vor allem für Labor- und Pilotversuche zum Einsatz von Biokohle im Elektrostahlprozess, aber auch für die Begleitung und die Auswertung betrieblicher Versuche im Stahlwerk zuständig.

Versuche mit verschiedenen Biokohlen im Labormaßstab konnten bereits zeigen, dass Biokohle insbesondere für den Einsatz als Injektionskohle prinzipiell geeignet ist. Aufgrund der höheren Reaktivität der Biokohle im Vergleich zu Anthrazitkohle konnte sogar ein intensiveres Aufschäumen der Schlacke beobachtet werden. Da die im Projekt zur Verfügung stehenden Biokohlen in Form von feinem Schüttgut vorliegen, werden derzeit, vorbereitend für den im Projekt geplanten Einsatz als Satzkohle im Pilotversuch sowie im industriellen Versuch, verschiedene Möglichkeiten der Agglomeration untersucht.

Trotz weiter zu untersuchender Teilaspekte, konnte das GreenEAF-Projekt bereits einige vielversprechende Ergebnisse liefern, die für eine technische Eignung der Biokohle zur Substitution von fossilen Kohlenstoffträgern sprechen. Die mögliche signifikante Reduktion an direkten Emissionen des EAF würde zudem mit einem geringeren CO<sub>2</sub>-Zertifikatbedarf und somit einer Kostenreduktion einhergehen.

### 2.6.3. Werkstofftechnik von Eisen und Stahl

Hochqualitative Werkzeugstähle sind ein Schlüsselfaktor für die hohe Produktivität deutscher Unternehmen; das gilt für die Herstellung metallischer Bauteile ebenso wie für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen. Demnach ist deren Verfügbarkeit für alle deutschen Werkzeugstahlhersteller und industriellen Anwender – darunter insbesondere die Werkzeugbauer, Kaltmassivumformer, Gesenkschmiedebetriebe, Druckgießer, Strangpresser und Kunststoffformgeber – von sehr hoher Relevanz. Das spezifische Eigenschaftsprofil der eingesetzten Werkzeugstähle, wie eine hohe Härte und gute Verschleißbeständigkeit, wird derzeit mit Hilfe der Legierungselemente Kobalt, Molybdän, Wolfram, Vanadium und Niob eingestellt. Studien belegen, dass diese Elemente zu den kritischen Rohstoffen gehören, deren Verfügbarkeit mittel- bis langfristig für Europa nicht gesichert ist. Das hohe Risiko besteht, neben der Konzentration der Produktion auf wenige Regionen (Länderkonzentration), zudem aus einem hohen politischen Risiko der jeweiligen Länder (gewichtetes Länderrisiko der Produktion). Ende der siebziger und achtziger Jahre wurden unter dem Oberbegriff der Maraging-Stähle bereits neue hochfeste Werkstoffe bis zur industriellen Einsetzbarkeit entwickelt, die ihre Eigenschaften durch die Ausscheidung intermetallischer Phasen erlangen, jedoch ebenfalls hohe Gehalte an Molybdän und Kobalt enthalten.



Bild 15: Werkzeugstahl im Einsatz

Tabelle 1: Verbrauch einzelner Legierungselemente pro Jahr

Legierungselement	weltweit	Deutschland
	t	
Wolfram	30.000	6.000
Vanadium	20.000	4.000
Molybdän	30.000	6.000
Chrom	50.000	10.000
Kobalt	20.000	4.000

Die Grundidee eines an der RWTH gemeinsam mit industriellen und weiteren Forschungspartnern durchgeführten Projektes ist, kritische Legierungselemente durch die gezielte Einbringung von hochfesten intermetallischen Phasen zu ersetzen. Dazu müssen diese in ihren spezifischen Eigenschaften sowie in ihrer Morphologie im Werkzeugstahl kontrolliert eingestellt werden. Die hierzu notwendigen numerischen Simulationsmöglichkeiten sowie die experimentelle Versuchskette sind innerhalb der Institute vorhanden. Eine Abschätzung des Einsparpotentials ergibt, dass die Substitution des Elementes Kobalt, bei einem Verbrauch von etwa 4.000 t in der Werkzeugstahlindustrie (Tabelle 1), allein in Deutschland zu einer Einsparung von etwa 100 Millionen Euro führt.

#### 2.6.4. Gießereitechnik

Die Koppelung von numerischer Simulation und Empirik ist Grundlage für eine effiziente Forschung im Bereich der Gießereitechnik. Heute werden neben der Anwendung kommerzieller Simulationsprogramme auch eigene Modelle am Gießerei-Institut (GI) entwickelt. Aktuelle Modelle dienen der Vorhersage von Mehrphasenströmungen, Erstarrungsprozessen, der Mikroseigerung oder ganzer Prozesse. Derart können auch ohne aufwändige Versuchskampagnen umfangreiche Vorhersagen zur Lösung anwendungsspezifischer Fragestellungen getroffen werden, was eine ressourcenschonende Forschung ermöglicht.

Weiterer Themenschwerpunkt ist die Entwicklung neuer Werkstoffe. Beispielsweise werden Motoren zur Senkung des Verbrauchs durch Steigerung des Wirkungsgrades mit immer höherem Druck betrieben. Konventionelle Legierungen stoßen hier längst an ihre Grenzen, so dass Neu- und Weiterentwicklungen zwingend erforderlich sind. Dies wird mittels moderner Methoden der Materialforschung durchgeführt. Hierzu gehören die thermodynamische Berechnung und Analytik sowie Experimente zur Gefügeausbildung und den gießtechnologischen Eigenschaften. Hinsichtlich des Ziels stark verbesserter Eigenschaften stehen neben der Entwicklung von Primär- vor allem auch die Weiterentwicklung von Sekundärlegierungen und das Recycling im Fokus.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt sind Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, wie etwa im Exzellenzcluster *Integrative Produktionstechnologie für Hochlohnländer*. Ein wesentliches Ziel ist die Ermöglichung einer individualisierten Produktion, was u.a. durch die Flexibilisierung von Massenfertigungsverfahren erreicht wird. Das Gießerei-Institut beschäftigt sich dabei erfolgreich mit der Kombination von Druckguss- und Spritzgussverfahren, mit der in-situ Metallkunststoffbauteile erzeugt werden können (Bild 16). Neben dieser Technologie werden Anwendungsuntersuchungen und Potentialabschätzungen an neuartigen Stahlblech-Leichtmetallguss Hybriden durchgeführt, deren Potential oberhalb der Leistungsfähigkeit dünnwandiger, geschlossener Blechstrukturen aus modernen, hochfesten Stahlwerkstoffen sowie von reinen Aluminiumstrukturen in Fertigungsmischbauweise liegt, so dass sich derart z.B. das Gewicht von Strukturbauteilen im Automobil um über dreißig Prozent reduzieren lässt.

Die Entwicklung von Werkstoffen und Verfahren zur Herstellung von Turbinenschaufeln ist seit vielen Jahren eine Forschungstätigkeit, bei der es primär um die Erzeugung und Verarbeitung leichter, hochtemperaturstabiler Materialien geht, die durch die Reduzierung der bewegten Masse ein enormes Potential zur Energieeinsparung darstellen. Zurzeit wird neben faserverstärktem NiAl, bei dem durch gerichtete Erstarrung in-situ Fasern bzw. Lamellen erzeugt werden, auch die Entwicklung der sog. Thin Shell Casting Technologie (TSC) vorangetrieben, welche die Herstellung gerichtet erstarrter oder einkristalliner Gussteile ermöglicht.

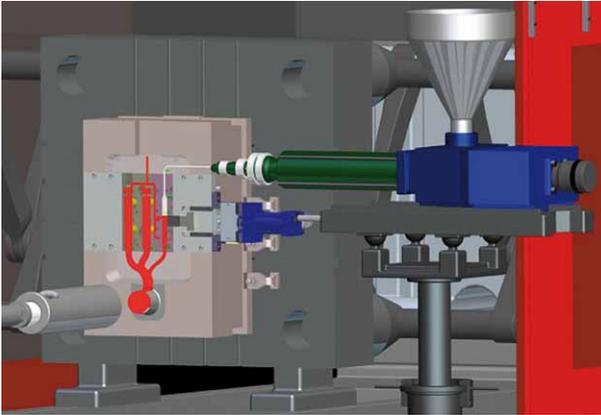


Bild 16:

In-situ Herstellung von Metallkunststoffbauteilen (rot: Druckguss, weiß: Spritzguss) zur Flexibilisierung von Massenfertigungsverfahren

## 2.7. Systemintegration durch Prozessleittechnik

Brennstoffzellen sind ein wichtiger Bestandteil in unserer zukünftigen Energieversorgung. Mit Ihrer Variabilität sind sie für verschiedenste Anwendungen im mobilen und stationären Bereich geeignet. Als Anwendungsbeispiele sind vor allem der Automobilbau, aber auch Heizungsanlagen, Notstromaggregate und Blockheizkraftwerke zu nennen.

Da die Speicherung und der Transport von Wasserstoff aus verschiedenen Gründen problematisch sind, wird vor Ort die Erzeugung des von der Brennstoffzelle benötigten Wasserstoffs angestrebt. Eine Möglichkeit ist hierfür die Erzeugung von Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen (z.B.: Erdgas oder Diesel), die sogenannte Reformierung. Die Vorteile liegen dabei in der zur Verfügung stehenden Transportinfrastruktur, dem im Vergleich zur Verbrennung höheren Wirkungsgrad und der Möglichkeit der einfachen Synthetisierung von Kohlenwasserstoffen.

Am Lehrstuhl für Prozessleittechnik wird zurzeit ein solches Reformier-Brennstoffzellen System aufgebaut, das mit Methan betrieben wird.

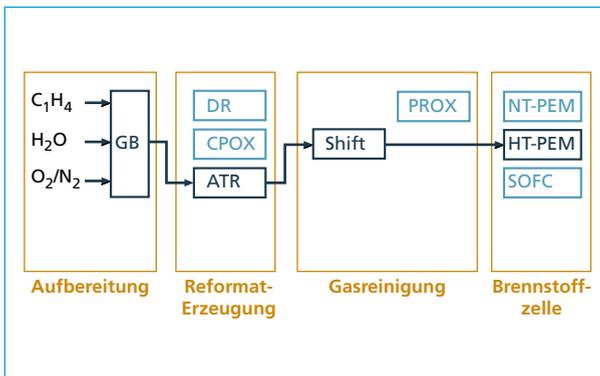


Bild 17:

Systemintegration durch Prozessleittechnik am Beispiel eines Reformier-Brennstoffzellen-Systems

Der modulare Aufbau des Systems, die vielfältigen, nichtlinearen Zusammenhänge und die abnahmeseitig getriebenen (elektr. Last an der Brennstoffzelle wechselt) Betriebszustände sind von hohem Interesse für regelungstechnische Untersuchungen und eine Herausforderung für die Prozessführung. Weiterhin sind Untersuchungen und Methoden nötig, mit denen man die Anzahl der Sensoren reduzieren und dennoch den Prozess effizient betreiben kann. Hier bieten prozessbegleitende Simulationen einen Ansatz, um aus wenigen Messwerten auf weitere Prozesswerte zu schließen.

### 3. Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel stellt das Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie vor, welches sich als instituts- und fakultätsübergreifende Institution mit angegliederter Industriebeirat versteht. Mit Zugriff auf über zwanzig Professuren und annähernd 300 wissenschaftlichen Mitarbeiter(innen) ist es aktuell das größte seiner Art in Deutschland. Durch die Struktur des AKR ist eine enge Verknüpfung von wissenschaftlichen Erkenntnissen und industrieller Praxis gewährleistet.

Ein Hauptziel des gemeinnützigen Vereins ist es, die Umsetzung von wissenschaftlich gewonnenen Erkenntnissen in die industrielle Praxis, insbesondere in den Bereichen der Aufbereitung, Extraktion, Weiterverarbeitung, Anwendung und Rückgewinnung von metallischen und nichtmetallischen Wert- und Werkstoffen, zu erreichen. Des Weiteren wird über entsprechende Publikationen der Wissensstand auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie verbreitet.

Das AKR sieht seine Aufgabe in der Förderung der interdisziplinären Grundlagen- und angewandten Forschung über die umweltverträgliche und nachhaltige Nutzung von natürlichen und anthropogenen Ressourcen. Die Stärke der Vereinsinstitution liegt hierbei in der Integration bereits bestehender Netzwerke aus universitären und privaten Forschungseinrichtungen sowie Industrieunternehmen. Die Aufgaben des Vereins werden in enger Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen University und ihren angegliederten Forschungs-Clustern verfolgt.

Anhand der vorgestellten Forschungsfelder wird deutlich, dass die Aachener Experten auf dem Gebiet der Ressourcentechnologie international und interdisziplinär aufgestellt sind und über ein großes Repertoire an anwendungsbetonten Lösungsansätzen mit hohem Neuerungscharakter und Demonstrationswert verfügen. Dadurch werden Stellschrauben der ressourcentechnologischen Prozesse bzw. Vorgänge aufgezeigt, für die noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Das ausgewählte Themenspektrum reicht dabei von der Georessourcenforschung, neuartigen Ansätzen im Bereich der Bergbautechnik, sensorgestützter Sortierung von Erzen und Sekundärrohstoffen über metallurgische Prozess- und Ofentechnik mit ihren Einsatzmöglichkeiten für regenerative Kohlenstoffträger bis hin zu anwendungsspezifischen Rohstofffragen der Werkstofftechnik und der abschließenden Systemintegration durch Prozessleittechnik.

#### Danksagung

Der Vereinsvorstand, vertreten durch seinen Vorsitzenden Professor Bernd Friedrich, und die Geschäftsführung in Person von Kilian Gisbertz, danken den im AKR assoziierten Experten für ihre Beteiligung an diesem Fachbeitrag.