

Aufbereitungstechnik

Aktuelle verfahrenstechnische Fragestellungen für die Aufbereitung von mineralischen, nachwachsenden und sekundären Rohstoffen

Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppen

- » Zerkleinern / Klassieren
- » Grenzflächenbestimmte Systeme
- » Mechanische Flüssigkeitsabtrennung



IMPRESSUM

Autoren

Prof. Dr.-Ing. U. A. Peuker, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik

Prof. Dr.-Ing. A. Kwade, TU Braunschweig, Institut für Partikeltechnik

Prof. Dr.-Ing. U. Teipel, Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg, Professur für Mechanische Verfahrenstechnik

Dr.-Ing. H.-G. Jäckel, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik

Dr.-Ing. T. Mütze, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik

Herausgeber

ProcessNet-Fachgruppen

„Zerkleinern/Klassieren“

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade, TU Braunschweig

Dr.-Ing. Frank Müller, BASF SE, Ludwigshafen

„Grenzflächenbestimmte Systeme“

Vorsitzender: Dr. Thomas. Danner, BASF SE, Ludwigshafen

„Mechanische Flüssigkeitsabtrennung“

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger, TU Kaiserslautern

Dipl.-Ing. Ulrich Esser, Bayer Technology Services GmbH, Leverkusen

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.

Dr. Andreas Förster

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Mai 2012

ISBN: 978-3-89746-131-4

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einführung | 2 |
| 2. Aufbereitungstechnik | 4 |
| 3. Schnittmenge der Aufbereitungstechnik mit den Fragestellungen der Mechanischen Verfahrenstechnik | 6 |
| 4. Technologisch-wissenschaftliche Herausforderungen | 7 |
| 4.1. Mineralische Rohstoffe (mineral raw materials) | 7 |
| 4.1.1. Erze mit besonderen Herausforderungen | 7 |
| 4.1.2. Verfügbarmachen von Hochtechnologierohstoffen | 8 |
| 4.1.3. Energieeffiziente Prozesse | 9 |
| 4.1.4. Prozessverbesserung / Prozessoptimierung | 9 |
| 4.1.5. Gewinnung und Aufbereitung unter besonderen Randbedingungen | 9 |
| 4.1.6. Konzept „Future Mine“ | 10 |
| 4.2. Energierohstoffe | 11 |
| 4.2.1. Kohlenwasserstoffe aus Teer- und Ölsanden | 11 |
| 4.2.2. Kernbrennstoffe | 12 |
| 4.3. Nachwachsende Rohstoffe | 12 |
| 4.4. Recycling | 14 |
| 5. Verfahrenstechnischer Beitrag | 17 |
| 5.1. Mechanische Verfahrenstechnik: Zerkleinerung/Klassieren | 17 |
| 5.2. Mechanische Verfahrenstechnik: Sortieren | 19 |
| 5.3. Mechanische Verfahrenstechnik: Mechanische Trenntechnik | 20 |
| 5.4. Bioverfahrenstechnik | 20 |
| 5.5. Grenzflächenverfahrenstechnik | 21 |
| 5.6. Extraktion und Chromatographie | 22 |
| 5.7. Alternative und Hybride Prozesse | 22 |
| 5.8. Prozesstechnik | 23 |
| 6. Zusammenfassung | 24 |
| 7. Quellen | 25 |

1. Einführung

Eine Technologiesgesellschaft, wie die deutsche, die zentral auf Industrien der Metallverarbeitung, des Maschinenbaus, der Werkstoffwissenschaften, der Chemie und Pharmazie sowie der Halbleitertechnologie aufbaut, benötigt kontinuierlich Ausgangsstoffe und -materialien für ihre Wertschöpfung. Aus wirtschafts- und geopolitischen Gründen sowie aus kurzfristigen Überlegungen ist seit Ende der 1980er Jahre der Bereich der Rohstoffversorgung, d.h. der Exploration, der Gewinnung und der Aufbereitung von Rohstoffen, zunehmend aus dem wirtschafts- und wissenschaftspolitischen Fokus gerückt. Dies gilt primär für die Nicht-Energierohstoffe. Als Konsequenz wurde als Randbedingung für den überwiegenden Teil aller wirtschaftlichen Planungen die Verfügbarkeit von kostengünstigen metallischen Rohstoffen, z. B. Erzkonzentraten, in ausreichender Quantität vorausgesetzt.

Diese Randbedingungen haben über einen Zeitraum von fast 25 Jahren dazu geführt, dass die Forschung und Entwicklung im akademischen Bereich und das Engagement von deutschen Industrieunternehmen in den relevanten Forschungsfeldern nahezu zum Erliegen kam. Dies hat

sich ferner darin ausgewirkt, dass die Zahl der relevanten Lehrstühle an den montanwissenschaftlich geprägten Hochschulen reduziert wurde und auch hier Teilbereiche der Wertschöpfungskette nicht mehr abgedeckt werden können. Zum anderen hat es direkte oder durch Verschiebung der Forschungsschwerpunkte einer besetzten Professur auch indirekte Neuausrichtungen relevanter Lehrstühle außerhalb der montanwissenschaftlichen Schwerpunkte gegeben.

Im aktuellen Kontext hat sich seit ca. fünf Jahren gezeigt, dass die marktpolitischen Randbedingungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von mineralischen und metallischen Rohstoffen nicht mehr gelten [23]. Durch einen weltweiten industriellen Boom in den Schwellenländern haben „ewige Materialien“ wie bspw. Kupfer, Nickel und Kobalt eine Verknappung erfahren. Neue Technologiebereiche und eine allgemeine Erhöhung der Komplexität technischer Gegenstände führen zu einer erhöhten Nachfrage an Rohstoffen, die bisher als Beiprodukte in ausreichender Menge angefallen sind [21]. Das allgemeine weltweite Wirtschafts- und Produktivitätswachstum führt ferner

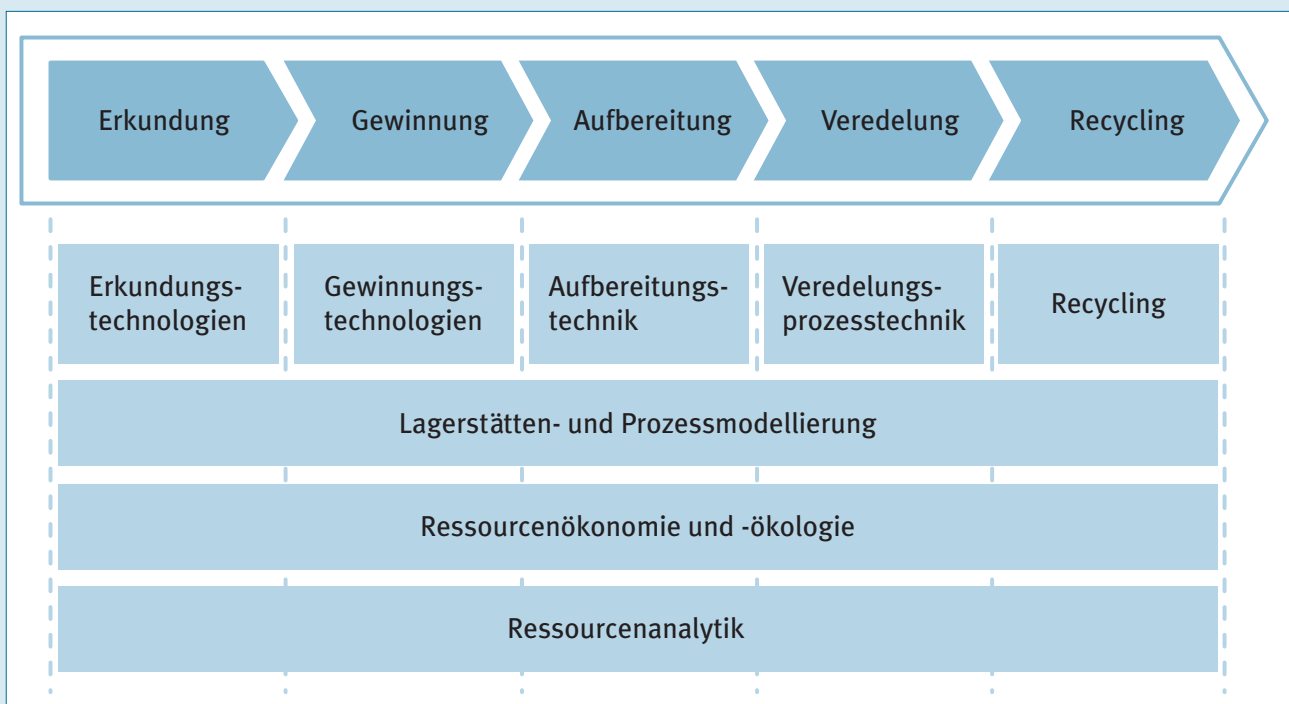


Bild 1: Rohstoff-Wertschöpfungskette mit Querschnittsfunktionen (nach Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie 2011, [16]).

dazu, dass nun der jeweilige Bedarf nicht mehr aus Lagerstätten mit einer hohen Erzqualität (hoher Gehalt, geringe Verwachsung) gedeckt werden kann. Somit rücken auch weltweit komplexe Lagerstätten in den Blickpunkt.

Technologisch kann ein Recycling bei der Diskussion der Rohstoffversorgung nicht ausgespart werden. Recycling allein kann aber nicht den Rohstoffbedarf eines sich im Wachstum befindlichen Segments decken, ist aus einer Vielzahl von Gründen aber eine wichtige Ergänzung. Unter anderem stellt Recycling im Sinne des „Urban Mining“ eine heimische, geopolitisch sichere Rohstoffquelle dar. Ferner liegt in vielen Fällen die Wertstoffkonzentration im Recyclat über der eines vergleichbaren Erzes.

Betrachtet man die historische Entwicklung der verfahrenstechnischen Lehrstühle in Deutschland hinsichtlich der Denomination und des Forschungsprofils, so ist festzustellen, dass auch hier der Strukturwandel der heimischen Industrie abgebildet ist. Allerdings konnte seit den 1960er Jahren dieser Wandel ohne einen abrupten Bruch stattfinden. Die grundlegenden Verfahrensweisen und

damit mehr oder weniger auch der Kern der Lehrinhalte sind erhalten geblieben, die Anwendungsfragestellungen sind den „Megatrends“ der jeweiligen Dekaden gefolgt: Chemische Industrie, Umwelttechnik und Recycling, Feinchemie und pharmazeutische Produktion, Nanotechnologie sowie Biotechnologie. Die Werkzeuge der verfahrenstechnischen Forschung und Entwicklung sind über den Zeitraum unverändert breit aufgestellt gewesen zwischen Modellbildung, Modellierung sowie experimentellen Vorgehensweisen.

2. Aufbereitungstechnik

Schubert (Bergakademie Freiberg) definiert Aufbereitungstechnik im Vorwort der zweiten Auflage des Standardwerks „Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe“ 1975 [13] wie folgt:

„Der Begriff Aufbereitung, der ursprünglich vom Erzbergbau geprägt worden sein dürfte, wird heute für Kombinationen von Prozessen und Verfahrensstufen in verschiedenen volkswirtschaftlichen Bereichen benutzt. Unter der Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe ist die erste Verarbeitungsstufe fester mineralischer Rohstoffe mit dem Ziel zu verstehen, daraus körnige Absatzprodukte zu erzeugen, an deren stoffliche Zusammensetzung und physikalische (insbesondere körnungsmäßige) Eigenschaften bestimmte Anforderungen gestellt werden. Diese Absatzprodukte werden entweder unmittelbar verwertet (z. B. Kalidüngesalze, Feuerkohle) oder aber nachfolgenden Verarbeitungsstufen (Metallurgie, chemische Industrie, Bauindustrie, keramische und Glasindustrie u.a.) zugeführt. In neuerer Zeit hat die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen, insbesondere von metallischen, stark an Bedeutung gewonnen. Mit ihrer Hilfe sollen die enthaltenen Wertstoffe in Produkten geeigneter stofflicher

Zusammensetzung und mit günstigen physikalischen Eigenschaften der volkswirtschaftlichen Nutzung erneut zugeführt werden. [..].“

Kellerwessel (Univ. Stuttgart) rundete diese Darstellung 1991 ab [12]:

„Die Aufbereitungstechnik umfasste früher primär das Behandeln bergmännisch gewonnener Rohstoffe nach Verfahren, die man heute unter dem Begriff Mechanische Verfahrenstechnik subsummiert – im Gegensatz zu den metallurgischen Verfahren, bei denen die nutzbare Komponente chemisch verändert wird, wie beispielsweise bei der Reduktion von Eisenerzen, als Eisenoxiden, zu metallischem Eisen, sowie im Gegensatz zur allgemeinen chemischen Verfahrenstechnik. [..].“

Zusammengefasst ist die Prozesskette der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe mit dem Übergang in die Veredelung (Hydrometallurgie) in Bild 2 dargestellt. Ziel der mechanischen Aufbereitung ist es, durch Zerkleinern den komplexen Materialverbund Erz in Einzelpartikel zu überführen. Diese Einzelpartikel sollen möglichst in ihrer

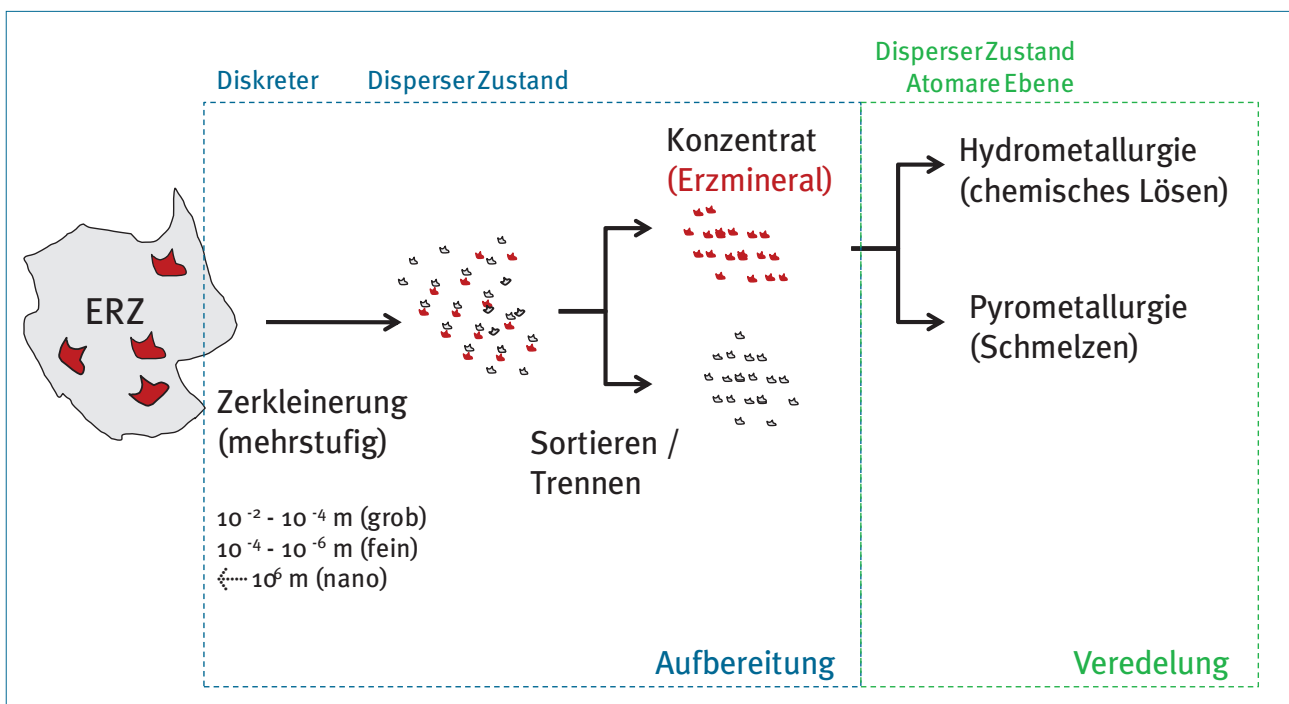


Bild 2: Schematische Darstellung der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe. Analog kann die Einteilung auch auf sekundäre und nachwachsende Rohstoffe angewendet werden, wobei ggf. die Größenklassen der Zerkleinerung größer sind.

Material-, bzw. Mineralzusammensetzung homogen sein, d.h. nur aus einer Spezies bestehen. Dies beinhaltet die Annahme, dass der Bruch vorrangig an Materialübergängen innerhalb des Feststoffs, d.h. an den Korngrenzen eines Erzes, stattfindet. Die so entstandene Mischung kann durch verschiedene physikalische und physikalisch-chemische Sortierverfahren in ein Konzentrat (hoher Anteil an Zielmineral) und die Berge überführt werden. Kenngrößen für die Erzeugung des Konzentrats sind das Wertstoffausbringen und die Wertstoffkonzentration. Die Effizienz und Selektivität dieser Sortierverfahren bestimmen die Anwendbarkeit und die Wirtschaftlichkeit einer Aufbereitung.

Im Zielmineral des Konzentrats ist das Zielelement in einer der Stöchiometrie des Kristalls gehorchenden Konzentration enthalten. Das Entfernen des Zielelements aus der Kristallstruktur kann nur durch die Störung bzw. Auflösung derselben erfolgen. Hierfür kommen Schmelz-, Röst- und Lösungsprozesse zum Einsatz. Für Anwendungen der Mechanischen Verfahrenstechnik sind vor allem Lösungsprozesse von Bedeutung, da bei selektivem Lösen bzw. bei Rekristallisations- sowie Fällungsprozessen, die mechanische Flüssigkeitsabtrennung eine Kerntechnologie darstellt, die Nachhaltigkeit und Ausbeute bestimmen kann.

3. Schnittmenge der Aufbereitungstechnik mit den Fragestellungen der Mechanischen Verfahrenstechnik

Da die heutigen verfahrenstechnischen Disziplinen eine direkte Wurzel in der Rohstoff- und Grundstoffindustrie besitzen, besteht auch heute noch eine sehr große Schnittmenge vor allem mit der Mechanischen Verfahrenstechnik als Disziplin zu aufbereitungstechnischen Fragestellungen. Durch den Strukturwandel fokussierte sich die Verfahrenstechnik auf die jeweils aktuellen Fragestellungen wie Feinchemie oder Biotechnologie. Hierdurch bedingt wurde das Detailwissen über stoffliche Parameter von Erzen und Mineralen sowie die erforderlichen Anlagengrößen verringert, bzw. völlig abgebaut.

Ein typischer Aufbereitungsprozess gliedert sich im Idealfall in die Schritte:

- » Vergleichmäßigen (Blenden von Erzen)
- » Grobzerkleinerung
- » Vorsortieren
- » Aufschlusszerkleinerung
- » Sortieren
- » Konfektionieren des Konzentrats (bspw. Agglomeration)
- » Behandlung der Reststoffströme (Berge, Schlämme, Prozessflüssigkeiten)

Diese Teilschritte können als Makroprozesse der Mechanischen Verfahrenstechnik begriffen und beschrieben werden.

Der mechanische Aufbereitungsprozess erstellt ein Erzkonzentrat, das im folgenden Schritt der Metallurgie zugeführt wird. Es erfolgt entweder eine hydrometallurgische, eine pyrometallurgische oder eine kombinierte Behandlung des Konzentrats, um im Sinne der „Veredelung“ die Atome der Zielelemente aus dem Kristallgitter auf atomarer Ebene herauszutrennen. Die Metallurgie besitzt große Verwandtschaft zu Fragestellungen der Thermischen Verfahrenstechnik und Technischen Chemie (Kristallisation, Extraktion, Ionentausch), aber auch der Mechanischen Verfahrenstechnik (Filtration, Waschung, Membranprozesse).

Betrachtet man zusätzlich noch die Prozesse der Geo-Bioverfahrenstechnik, die eine alternative Methode zur Ge-

winnung von Metallen aus Erzen darstellen, sind auch bioverfahrenstechnische Prozesse relevant. Die Aufbereitung für ein Bioleaching gliedert sich idealisiert in die Schritte:

- » Vergleichmäßigen (Blenden von Erzen)
- » Grobzerkleinerung
- » Lagerung als Halde mit definierter Durchlässigkeit (Haldenlaugung)
- » Laugung durch Interaktion Mikroorganismus-Erz
- » Regelmäßige Umlagerung
- » Wassermanagement

Die Bergbau- und Mineralwirtschaft stellt sich aufgrund der extrem langen Investitionszyklen als sehr konservative Branche hinsichtlich der Einführungen neuer Technologien im Sinne „Sprung auf ein anderes Prinzip“ dar. Diese Randbedingungen gelten definitiv auch für die Anlagen der Aufbereitungstechnik, da diese in der Regel direkt am Standort der Gewinnung angesiedelt sind. Durch Herstellung eines Konzentrats ist es möglich, die zu transportierende Masse um ein Mehrfaches zu reduzieren.

Die Industrien, die aktuell Hauptkunden der verfahrenstechnischen Forschung und Entwicklung in Deutschland sind, haben in den vergangenen Dekaden durchaus neue Technologien der Mechanischen Verfahrenstechnik schnell und mit großem Erfolg ein- und umgesetzt. Hieraus ist abzuleiten, dass diese Branchen bezogen auf ihre Produkte einen Technologievorsprung zu aufbereitungstechnischen Anwendern haben. Hinzu kommt, dass deutsche Ausrüster im Bereich der Aufbereitungstechnik eine geringere Marktdurchdringung hinsichtlich der Apparate und Maschinen der Feststoffverfahrenstechnik aufweisen, als in den entsprechenden Branchen der weiterverarbeitenden Industrie. Das Angebot deutscher Hersteller von Aufbereitungsanlagen gehört qualitativ sowohl unter maschinenbaulichen als auch verfahrenstechnischen Aspekten zur weltweiten Spitzenklasse am Markt (z. B. Druckfilter für Aluminiumraffinerien, Brecher für Ölsande, Gutbettwalzenmühlen und Rührwerkskugelmühlen für u.a. Kupfer- und Platinerze, Mischer und Agglomeratoren für Eisenerze).

4. Technologisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Die Rohstoffwirtschaft befindet sich aktuell in einem Wandel, der sich aus einer langen Periode niedriger Rohstoffpreise von Mitte der 1980er Jahre bis Mitte des ersten Jahrzehnts des neuen Jahrhunderts ergibt. Diese Baisse der Rohstoffpreise ergab sich als Folge der politischen Verwerfungen mit dem Ende des kalten Krieges. Hierdurch sind für die westliche und insbesondere deutsche Wirtschaft Rohstoffanbieter verfügbar geworden, die vorher nicht zugänglich waren. Ferner sank die rohstoffaufwändige Industrieproduktion in Osteuropa. Zusätzlich dazu wurden in den späten 1970er Jahren viele Explorationsprojekte erfolgreich in eine Rohstoffproduktion überführt.

Diese weltweite fast 20 Jahre anhaltende Baisse führte zu einer Stagnation der Ressourcenforschung außerhalb der rohstoffproduzierenden Länder bzw. zu einem systematischen Abbau der Forschungs- und Entwicklungskapazitäten in diesem Bereich in Deutschland. Der steigende Rohstoffbedarf seit Anfang der 2000er Jahre hat in einem ersten Schritt zu einer Kapazitätserweiterung an bestehenden Standorten geführt. Doch diese großen Lagerstätten mit guter Aufbereitbarkeit und hohem Erzgehalt besitzen zum Teil nur noch eine begrenzte Reichweite. Ferner müssen nun für eine weitere Produktionssteigerung solche Lagerstätten berücksichtigt werden, die einen größeren Aufwand in der Gewinnung und oder Aufbereitung nach sich ziehen.

4.1. Mineralische Rohstoffe (mineral raw materials)

Unter mineralischen Rohstoffen werden Industriemineralien und metallhaltige Minerale (Erze) eingeordnet. Von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung besteht hier technologisch eine fließende Schnittstelle zur Baustofftechnologie sowie zur keramischen und glastechnischen Industrie. Industriemineralien wie metallhaltige Minerale (Erze) werden im Tagebau oder auch im untertägigen Abbau gewonnen. Die Schnittstelle zur Aufbereitung wird in der Regel nach dem Gewinnungsprozess, d.h. der Überführung in ein förderfähiges Schüttgut gesetzt. Im Tagebau können hier die maximalen Partikelgrößen bei 1000 mm und darüber liegen.

4.1.1. Erze mit besonderen Herausforderungen

Primäre Rohstoffquellen mit guter Zugänglichkeit und mittlerem bis hohem Wertstoffgehalt sowie einfacher Aufbereitbarkeit sind in Europa weitestgehend ausgebeutet. Auch weltweit sind für spezielle Metalle kaum noch Lagerstätten lokalisiert, die alle drei o.g. Kriterien erfüllen. Verfügbar bleiben also im Wesentlichen primäre Erzlagerstätten, die in wenigstens einem der o.g. Kriterien problematisch sind oder aber die wertstoffarmen Rückstände (Berge) früherer Aufbereitungsaktivitäten, die als sekundäre Lagerstätten (Halden) bezeichnet werden. Diese Lagerstätten mit geringen bzw. geringsten Wertstoffgehalten sowie komplizierter Vererzung bzw. komplexer Zusammensetzung sind aus verfahrens- bzw. aufbereitungstechnischer Sicht besonders interessant. Hierzu zählen:

- » Lagerstätten höherer Qualität (höherer Wertstoffgehalt), aber zu geringer Größe (geringer Wertstoffinhalt), die bisher nicht wirtschaftlich ausgebeutet werden konnten.
- » Lagerstätten geringerer Qualität (niedriger Wertstoffgehalt), aber ausreichender Größe (vglw. hoher Wertstoffinhalt), die als fein- und feinstverwachsene Erze (z. B. Skarne) vorliegen können und einen sehr hohen Aufbereitungsaufwand (z. B. Aufschluss unter 50 µm) erfordern.
- » Lagerstätten mit fein- und feinst verwachsenen Erzen sowie komplexer Zusammensetzung (Multilagerstätten, polymetallische Lagerstätten)
 - Lagerstätten, die nur wirtschaftlich ausgebeutet werden können, wenn ein Aufschluss und eine Sortierung im Partikelgrößenbereich kleiner 10 bzw. 2 µm erfolgt.
 - Lagerstätten mit einem geringen Gehalt an Wertstoff, der eine stärkere Aufkonzentrierung erfordert.
 - Lagerstätten, die nur wirtschaftlich ausgebeutet werden können, wenn mehrere Wertstoffe extrahiert werden.
- » Lagerstätten mit einem erhöhten Anteil an organischen, carbonatischen oder schwefelhaltigen Beimaterialien.

Zusammenfassend ist für die primäre Rohstoffseite festzustellen, dass die gewonnenen Stoffsysteme insgesamt feinstrukturierter und komplexer werden, wobei zunehmend geringe und geringste Wertstoffgehalte auftreten. Für die Aufbereitung ergibt sich daraus eine Verschiebung der im Rahmen der Prozesse zu handhabenden Partikelgrößen (Aufschlusspartikelgröße oder Flotationsfeinheit) in den Fein- bzw. Feinstkornbereich. Typische Aufschlusskorngrößen guter Lagerstätten liegen z. B. im Bereich 50-200 µm.

Ziel der FuE-Aktivitäten muss es daher sein, sowohl den mechanischen Aufschluss der Wertkomponenten als auch deren Anreicherung durch Sortierprozesse (Dichtesortierung, Flotation, Magnetscheidung und Elektrosortierung) und Klassierprozesse im Größenbereich bis 1 (0,5) µm sicher zu beherrschen.

4.1.2. Verfügbarmachen von Hochtechnologie-rohstoffen

Hochtechnologierohstoffe zeichnen sich durch ihre speziellen physikalischen Eigenschaften aus [23]. Vielfach sind es solche Metalle, die nicht als Massenmetalle bereitgestellt werden können. Für eine Vielzahl von Hochtechnologierohstoffen gilt, dass keine Lagerstätten existieren, die diese als Hauptinhaltsstoff besitzen [21]. Vielmehr wird die Vielzahl der Hochtechnologierohstoffe als Nebenprodukt der bekannten Massenrohstoffe (Fe, Ni, Cu, Pb, Zn, Sn, Al, Mg, u.a.) gewonnen (Bild 3). Um die Produktion von seltenen Hochtechnologierohstoffen zu steigern, ist es also erforderlich, die bestehenden Produktionsprozesse von Massenrohstoffen zu modifizieren und aus Teil-, Seiten- oder Abfallströmen die begehrten Materialien zu extrahieren. Vielfach ist dazu aber auch ein Eingriff in den Produktionsablauf des primären Produktes der Aufberei-

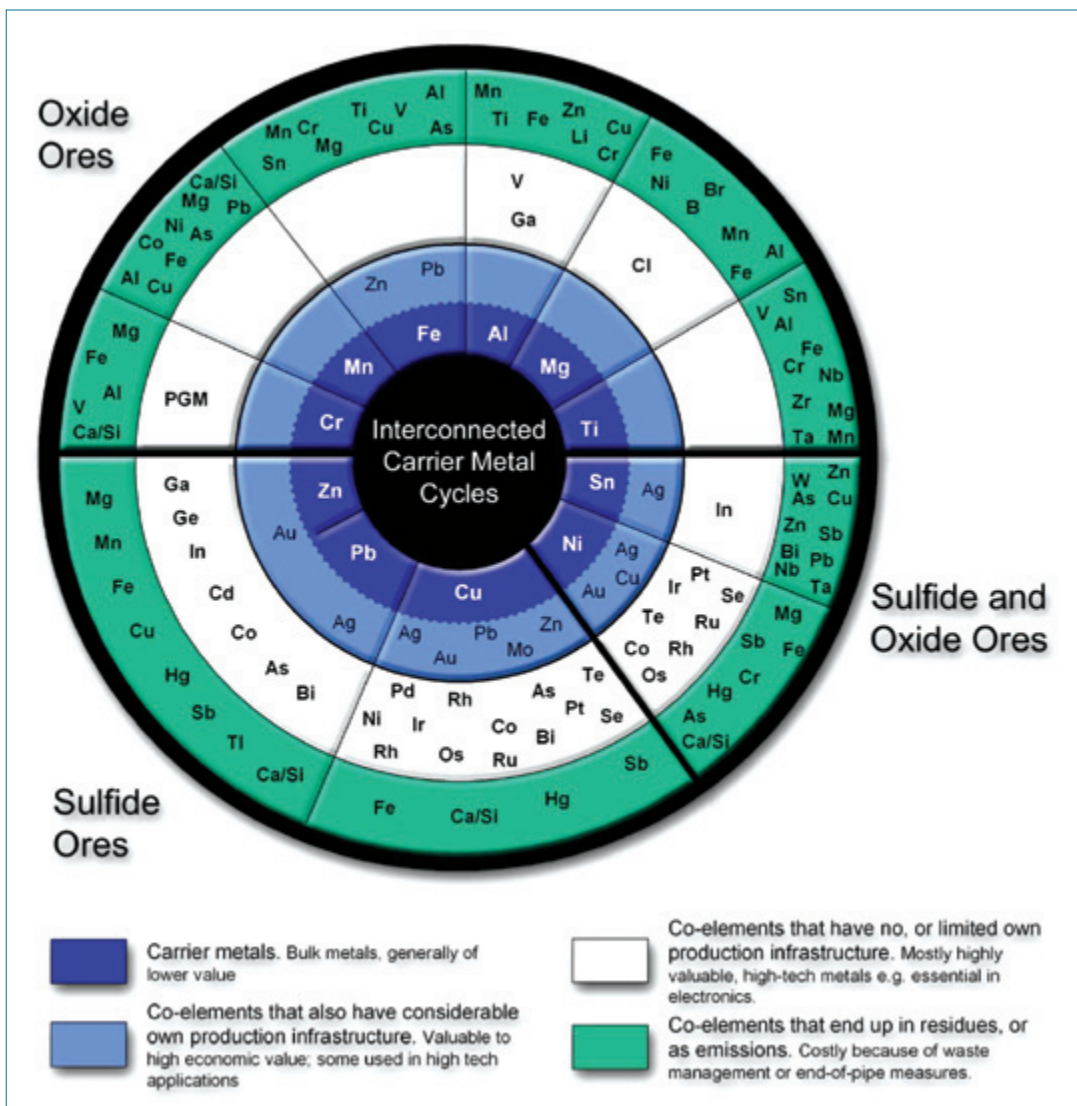


Bild 3: Darstellung der Verbindung verschiedener Elemente in typischen Erzen [4] (Rohstoffkreis nach Verhoef und Reuter [8])

tungs- bzw. Veredelungsanlage erforderlich, je nachdem wie die Erze strukturiert sind. Bei einer mikroskopischen Mischung ist ein Aufschluss und ein Sortieren möglich, bei einer atomaren Mischung ist ein chemischer Aufschluss (selektiv oder vollständig) erforderlich (vgl. Bild 2).

4.1.3. Energieeffiziente Prozesse

Vor allem Zerkleinerungs- aber auch Trocknungs- und Trennprozesse machen einen erheblichen Anteil am Primärenergieaufkommen in rohstoffproduzierenden Ländern aus. Mit steigender Weltproduktion und dem Trend, feinere Partikelsysteme handhaben zu müssen, ergibt sich ein weiter ansteigender Energiebedarf, was sich in den Kosten sowie in der CO₂-Bilanz der jeweiligen Prozesse niederschlägt. Diesem muss durch die Entwicklung und Einführung energieeffizienter Prozesse entgegengewirkt werden.

4.1.4. Prozessverbesserung / Prozessoptimierung

Weitere Randbedingungen beeinflussen einen möglichen neuen europäischen und prinzipiell auch weltweiten Bergbau. Politisch wird ein „zero footprint“ Mining angestrebt, also ein nachhaltiger Bergbau, der alle Kosten auch die der Renaturierung berücksichtigt [4]. Beispielhaft kann hier die angestrebte Kooperation der EU mit der Afrikanischen Union angeführt werden. Dem stehen typische und bekannte Konzepte des Umgangs mit Aufbereitungsrückständen, wie Halden oder Schlammteiche entgegen. Zeitgemäße Technologien des Bergbaus und der Aufbereitung müssen für

- » minimierte Emissionen (Staub, Abgase, Wasser, Chemikalien, mobilisierbare Erzbestandteile),
- » die Ausschleusung von Stör-, Fremd- und Schadstoffen,
- » geschlossene Wasserkreisläufe,
- » geschlossene Chemikalienkreisläufe,
- » eine geordnete Rückverfüllung des Bergematerials,
- » eine stoffliche Nutzung geeigneter Bergeströme als Baumaterial

sorgen.

Ferner muss die Steigerung der Nachhaltigkeit mit einer Effizienzsteigerung des Aufbereitungsprozesses selbst einhergehen. Die Effizienzsteigerung kann durch neue bzw. verbesserte Technologien erfolgen. Die Automatisierung und Führung eines Aufbereitungsprozesses, wodurch eine Anlage mit auf die momentanen stofflichen Parameter des Erzminerals abgestimmten Prozessparametern gefahren werden kann, birgt ein großes Potential [10]. Ein

solches integriertes Vorgehen wird auch unter dem Begriff Geometallurgie (engl. geometallurgy) verstanden [22]. Eine gute Basis hierfür kann auch die Prozesssimulation (statisch und dynamisch) von Feststoffprozessen sein, wie sie z. B. mit dem in der Entwicklung befindlichen Produkt SolidSim möglich ist.

4.1.5. Gewinnung und Aufbereitung unter besonderen Randbedingungen

Mariner Bergbau

Mariner Bergbau ist ein Zukunftsthema. Verschiedene Staaten, vor allem China und Indien, haben sich in den letzten Jahren stark engagiert. Auch Deutschland besitzt Explorationsgebiete im Pazifischen Ozean. Technologisch ist hier die Gewinnung von Erdgas und Erdöl aus submarinen Lagerstätten der Gewinnung von festen Rohstoffen um Jahrzehnte voraus. Hier existieren bereits autonome Förderstationen auf dem Meeresboden, die automatisiert das Wertprodukt an Sammelstellen offshore oder direkt an Land fördern. Für feste mineralische Rohstoffe ist eine komplexere Behandlung des abgebauten Erzes im Umkreis der Gewinnung notwendig. Somit muss ein Teil der Aufbereitung offshore stattfinden. Zurzeit sind folgende Lagerstätten in der Diskussion bzw. Voruntersuchung:

- » Manganknollen
- » Krusten
- » Shelf-Krusten
- » Grundschlämme (bspw. Rotes Meer)

Diese Lagerstätten sind hochkonzentriert und liegen oberflächennah vor, d.h. die Gewinnung unter Wasser (bis ca. 6000 m Meerestiefe) könnte durch Abfräsen, Einsammeln, Schlämmen und Abpumpen erfolgen [18]. Es ist davon auszugehen, dass der Hauptteil der Aufbereitung landgestützt als konventionelle Anlage erfolgen wird. Dennoch werden vor einer Verladung verschiedene Schritte notwendig:

- » Aufkonzentrieren d.h. Reduzieren des Meerwassergehalts
- » Nachhaltige Rückführung des Meerwassers
- » Optionale Vorsortierung, ggf. gekoppelt mit der Gewinnung
- » Rückführung der Berge der Vorsortierung.

Hierbei ist zwingend die Rückführung von Meerwasser und ggf. Bergen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten erforderlich.

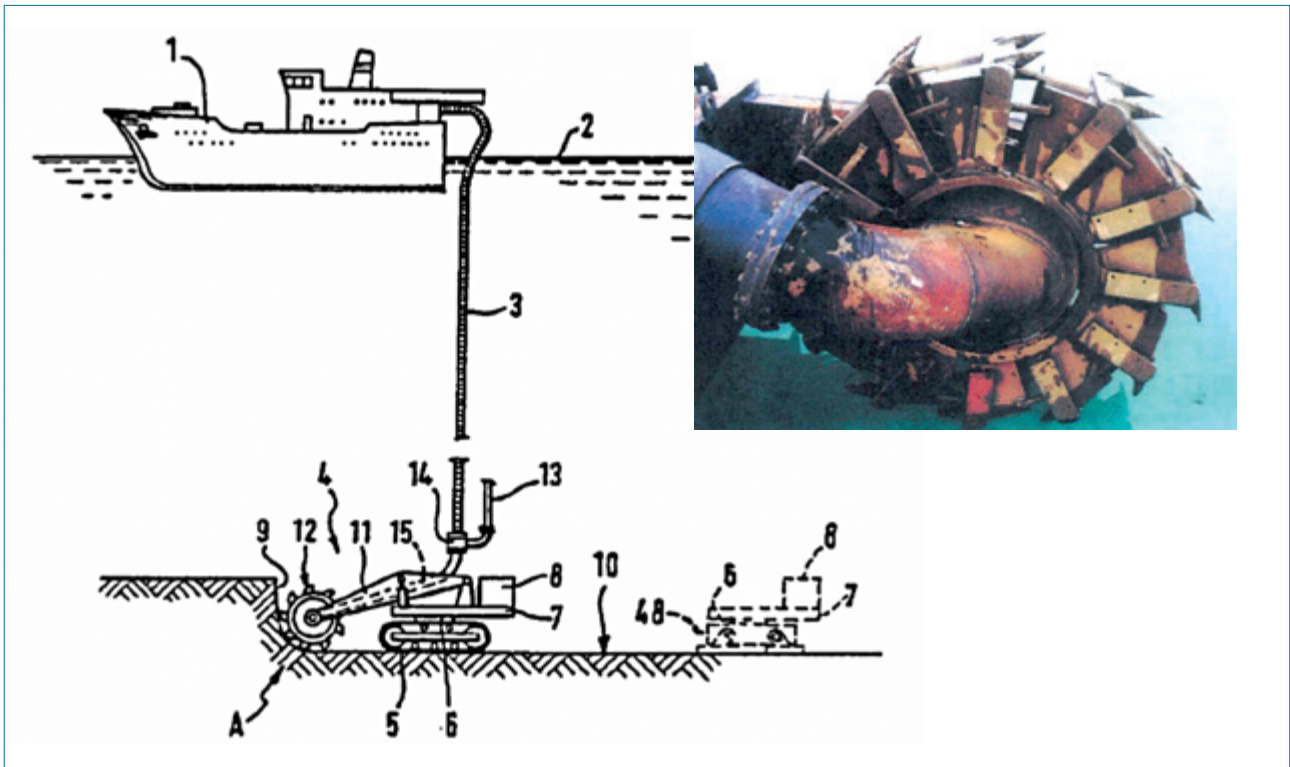


Bild 4: Gewinnungskonzept und technische Lösung für marinen Bergbau - mobiler Räumer für Grundbewegung (TU Freiberg)

Wasserarme Regionen

Zur Aufbereitung primärer Rohstoffe im Partikelgrößenbereich unterhalb von ca. 100 µm ist es meist erforderlich, nass arbeitende Prozessschritte zu nutzen. Dies betrifft sowohl die Aufschlusszerkleinerung (z. B. Nasskugelmöhlen), als auch die Anreicherung der Wertkomponenten durch Sortierprozesse (Dichtsortierung, Flotation, Nassmagnetscheidung) sowie die Entwässerungs- bzw. Entschlammprozesse. Prozesswasser ist demnach unabdingbar für eine Aufbereitung. Liegt allerdings die Lagerstätte in einer wasserarmen Region, muss ein hoher Aufwand betrieben werden, um das notwendige Prozesswasser bereit zu stellen. Zu wasserarmen Standorten zählen, Wüsten und Halbwüsten, Gebirgs- und Hochgebirgsregionen aber auch solche Standorte, bei denen aus Gründen des Umweltschutzes die natürlichen Wasserkreisläufe nicht beeinflusst werden sollten bzw. im Sinne eines nachhaltigen „green minings“ nicht beeinflusst werden dürfen. Bereits jetzt gibt es in Australien Minenstandorte, die über Pipelines mit Meerwasser für ihre Prozesse versorgt werden müssen.

Als Konsequenz kann ein Bedarf an wasserfreien bzw. Wasser sparenden Prozessen sowie an der Entwicklung von geschlossenen Wasserkreisläufen definiert werden. Letzteres impliziert auch die möglichst vollständige Deposition der Berge als Feststoff, sog. „dry tailings“, denn

die „tailings ponds“ sind die typische Senke für das Prozesswasser. Ein vollständiges Umstellen auf „dry tailings“ erfordert eine hochwertige Entfeuchtungstechnik und ggf. zusätzlich ein Konfektionieren feiner Bestandteile der Berge, damit diese nicht durch Wind erodiert werden. Die möglichst vollständige Kreislaufführung erfordert auch eine Reinigung bzw. eine Rekonditionierung der Wasserströme hinsichtlich des pH-Werts, Chemikaliengehalts (Flotationsmittel) und der Salzgehalte.

Es ist davon auszugehen, dass ein vollständig geschlossener Wasserkreislauf zurzeit nicht technisch und wirtschaftlich realisierbar ist, da mit dem Produkt und den mechanisch entfeuchteten „dry tailings“ immer noch ein gewisser Prozentsatz an Wasser aus der Aufbereitung entfernt wird.

Wasserfreie Prozesse erfordern es vor allem, trockene Sortierverfahren im Größenbereich kleiner 100 (50) µm verfügbar zu machen, d.h. in dem Bereich zu arbeiten, in dem die Partikel-Partikel-Wechselwirkung den Prozess zu dominieren beginnt.

4.1.6. Konzept „Future Mine“

Das Konzept „Future Mine“ entstammt dem MIFU-Report [10], einem Forschungskonsortium nordeuropäischer Bergbau- und bergbaunaher Firmen und Einrichtungen.

Das Konzept zielt auf die weitestgehende Automatisierung von Gewinnungs- und ersten Aufbereitungsschritten. Letztere sollen beim untertägigen Bergbau nicht mehr übertage stattfinden, sondern direkt an die Gewinnung gekoppelt untertage positioniert werden. Die hieraus entstehenden Vorteile sind:

- » die direkte Vorabscheidung erheblicher Bergeströme
- » die Möglichkeit der direkten Rückverfüllung
- » die Verbesserung von Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit
- » die Verringerung des Platzbedarfs übertage
- » die Verringerung des Aufwands für Umweltschutzmaßnahmen und Erhöhung der Nachhaltigkeit.

Die Automatisierung kann dadurch ermöglicht werden, dass bereits in der Gewinnung eine Umstellung vom Konzept Bohren und Sprengen auf ein Konzept der kontinuierlichen Gewinnung durch bspw. fräsende oder reißende Verfahren erfolgt. So wird im Flöz ein kontinuierlicher Massenstrom an Erz erzeugt. Dieser besitzt durch die Art der Gewinnung auch eine deutlich geringere Korngröße. Für die gekoppelte Aufbereitung sollte nach dem Konzept der semimobilen Anlagen eine direkte Weiterverarbeitung ortsnah erfolgen. Dies beinhaltet:

- » die Förderung vom Fräskopf zur Aufbereitungsstufe
- » eine weitere Brechstufe mit Bergevorabscheidung
- » die Mahlstufe
- » die trockenen Sortierprozesse (magnetisch, elektrostatisch, ggf. Dichtesortierung)
- » das Handling der abgetrennten Berge
- » das kompakte Rückverfüllen der Berge
- » als übergreifende Fragestellung die Beherrschung der Staubentwicklung.

Da es sich bei dieser Aufzählung durchweg um trockene Prozesse handelt, können diese semimobil bzw. kompakt ausgeführt werden und somit dem Ort der Gewinnung durch Umsetzen einfach nachfolgen. Es ist davon auszugehen, dass die nasse Aufbereitung in einem ersten Schritt weiterhin übertage oder zentral untertage erfolgt. Da diese Entfeuchtungstechnologie sowohl Wasseraufbereitung als auch Wassermanagement erfordert.

Handlungsbedarf Aufbereitung Mineralischer Rohstoffe:

Die Zukunft der Aufbereitung wird sich im Bereich feindisperser polymetallischer Partikelsysteme kleiner 10 µm abspielen, wofür neue Aufbereitungstechniken zu entwickeln sind. Die Gestaltung des Gesamtprozesses muss im Sinne des „green mining“ erfolgen; insbesondere im Bereich des ökologischen Tailingsmanagements. Die Prozessführung und der Anlagenbetrieb von Gewinnung und Aufbereitung werden stetig weiter automatisiert, was entsprechende interaktive Modelle erfordert.

4.2. Energierohstoffe

Der Bereich Energierohstoffe ist durch eine Vielzahl von strategischen Maßnahmen und richtungsweisenden politischen Entscheidungen bereits stark für die Forschungspolitik sichtbar. Hier fokussiert Deutschland primär auf die nachhaltige Nutzung der Energieträger.

Das Szenario einer prinzipiellen und zukünftigen Knappheit von Energierohstoffen am Weltmarkt ist bereits seit der „Ölkrise“ ein Leitmotiv für die Wissenschaftspolitik. Hier bieten die Verfahrenstechnik und die dazugehörige Apparatechnik der Aufbereitung Ansatzpunkte zur effizienten Förderung der Energierohstoffe. Deutsche Unternehmen besitzen in diesem Technologiefeld einen international konkurrenzfähigen Wissensstand, wodurch sich Exportchancen sowohl für die Technologie als auch für die Apparate ergeben. Zwei besondere Aspekte, da sie eine gewisse Verwandtschaft zu der Bereitstellung mineralischer Rohstoffe besitzen, werden exemplarisch vorgestellt.

4.2.1. Kohlenwasserstoffe aus Teer- und Ölsanden

Teer- und Ölsande unterscheiden sich von konventionellen Lagerstätten von Kohlenwasserstoffen dahingehend, dass das geförderte Produkt einen hohen (85-90%) Feststoffmassenanteil besitzt. Dieser Feststoff muss von dem Zielprodukt Bitumen abgetrennt werden. Diese Trennung erfolgt zurzeit nach dem Clark-Rowe-Prozess durch den Einsatz von Heißwasser unter Verwendung von bspw. NaOH. Die technischen Ausbeuten liegen bei 80-90% des Organik-Anteils. Als Nebenprodukt entstehen aus den Tonanteilen in der Feststofffraktion und den aus der Reaktion von NaOH mit den aus den organischen Säuren des Bitumens gebildeten Tensiden hochstabile kolloidale

Suspensionen. Diese werden in Schlammteiche, sog. Tailingsponds, verbracht. Die kolloidale Stabilität führt dazu, dass der Wasserkreislauf nicht geschlossen werden kann, da das Absetzen des Feststoffs in diesen Ponds Jahrzehnte in Anspruch nimmt. Neben dem verhältnismäßig hohen Energieeinsatz im Heißwasserprozess ist die Tailingsproblematik eine der zentralen Herausforderungen für eine nachhaltige Gewinnung von Öl aus Öl- bzw. Teersänden.

Die Gewinnung von Kohlenwasserstoffen beinhaltet auch Aspekte der Gewinnung von strategischen Hochtechnologiemetallen. Diese sind in merklichen Konzentrationen in den Stoffströmen der Erdölindustrie (Begleitwässer, Schwerölrückstände, ...) vorhanden, da grenzflächenaktive Bestandteile des Öls bzw. des Bitumens Metalle komplexieren und so zu einer Anreicherung führen. Es sind bspw. Anstrengungen bekannt, Titan und Vanadium als Koppelprodukt der Ölsandverarbeitung zu gewinnen.

Eine Ausweitung der Technologie der Ölsandgewinnung auf weitere Arten unkonventionellen Rohöls, wie es im Bereich der Ölschiefer und Kerogene zu finden ist, ist denkbar, wobei sich die Materialeigenschaften vor allem Viskosität und Löslichkeit bedingt durch unterschiedliche Vernetzungsgrade z.T. erheblich unterscheiden.

4.2.2. Kernbrennstoffe

Kernbrennstoffe sind mineralische Rohstoffe. Durch die politische Weichenstellung des Atomausstiegs in Deutschland erscheint zum jetzigen Zeitpunkt keine nationale Forschungsförderung zur Optimierung der Förderung und Verarbeitung in diesem Bereich notwendig.

Die Beschäftigung mit diesem Themenfeld ist allerdings notwendig, da potentielle Kernbrennstoffe mögliche Begleitminerale strategischer Rohstoffe sind. Für eine nachhaltige Ausbeutung dieser strategischen Rohstoffe ist auch das Beherrschen der radioaktiven Begleitminerale notwendig. Typische Beispiele hierfür sind:

- » Uran in Phosphorlagerstätten
- » Thorium und Uran in Lagerstätten seltener Erden
- » Uran als Begleitmineral in polymetallischen bspw. hydrothermalen Lagerstätten
- » Uran und Thorium in Lagerstätten von Schwersanden.

Es ist somit notwendig, Expertise aus der Altlastensanierung und der Radiochemie in Bergbau und Aufbereitung einzubringen, um einen technologischen Wettbewerbsvorteil und einen Vorteil im Bereich Nachhaltigkeit zu

erzielen. Die typische Schnittstelle zur Aufbereitung wird sich im Tailingsmanagement finden. Es müssen Aufbereitungskonzepte entwickelt werden, die eine wirkliche Eindämmung der natürlich vorkommenden radioaktiven Komponenten (NORM) und deren möglicherweise im Aufbereitungsprozess entstehenden Konzentrate (TENORM) ermöglichen. Solche Tailingskonzepte gehen über die angestrebten Konzepte des Tailingsmanagements und des green minings konventioneller Rohstoffe hinaus.

4.3. Nachwachsende Rohstoffe

Die energetische und stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe kann einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von fossilen und anderen nicht-biogenen Ressourcen leisten. Nachwachsende Rohstoffe werden derzeit insbesondere zur Energieerzeugung als Biokraftstoff, biogener Festbrennstoff und Biogas eingesetzt. Die Europäische Union hat mit ihrer Richtlinie „Renewable Energy Directive“ [7] eine politische Vorgabe zur nachhaltigen Nutzung von Biomasse für Erneuerbare Energien gemacht. Bei der Nutzung von fester Biomasse, wie Abfällen aus der Forstwirtschaft oder der Holzindustrie, ist eine mechanische Aufbereitung durch Zerkleinerungs- und Klassierungstechnologien dringend erforderlich. Bei der Erzeugung von biogenen Brenngasen wird als Substrat oft feuchte Biomasse, zum Beispiel Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie oder der Landwirtschaft (Mist, Rübenblätter, Maisabfälle, etc.), eingesetzt, die nicht sinnvoll verbrannt werden kann. Vor der weiteren in der Regel biotechnologischen Umsetzung muss u.a. im Hinblick auf die zur Verfügung stehende spezifische Oberfläche und die Prozessausbeute ein mechanischer Aufbereitungsschritt vorgeschaltet werden.

Eine sehr interessante Verwendungsmöglichkeit nachwachsender Rohstoffe, die beachtliche Innovationschancen für neue Technologien und Produkte beinhaltet, ist die stoffliche Nutzung von Biomasse. Die wichtigsten nachwachsenden Rohstoffe, die in diesem Technologiefeld eine Rolle spielen, sind pflanzliche Öle und Fette, Raps, Stärke und Zucker (*Kartoffeln, Rüben und Zuckerrohr*), Holz, Naturfasern, Cellulose, Kautschuk, Harze, Getreide (*Stroh*) und auch Rohstoffe tierischer Herkunft (*Implantate*). Diese Vielfalt der nachwachsenden Rohstoffe macht deutlich, dass zur Verarbeitung dieser Rohstoffe neben der komplexen und rohstoffspezifischen Prozesstechnik eine ebenso rohstoffspezifische und aufwendige Aufbereitungstechnik erforderlich ist.

Durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe lassen sich z. B. metallische Katalysatoren durch Enzyme oder im Baubereich erdölbasierte durch biogene Dämmstoffe ersetzen. In Zukunft werden biogene Rohstoffe zu einem großen Teil als erneuerbare Kohlenstoffquelle für die chemische Produktion eingesetzt werden. So können auf Basis der nachwachsenden Rohstoffe chemische Vorprodukte, Feinchemikalien oder spezielle Materialien produziert werden.

Biogene Rohstoffe sind sehr komplex aus zahlreichen verschiedenen organischen Verbindungen mit unterschiedlichen Anteilen aufgebaut. Einen großen Prozentsatz machen Fette, Kohlenhydrate oder auch Sekundärmetabolite aus. Je nach Biomasse schwanken diese Anteile, so dass z. B. Holz deutlich andere Zusammensetzungen und auch Eigenschaften (nach denen auch der Aufbereitungsprozess konzipiert werden muss) aufweist, als Stärke- oder Ölpflanzen. Für diese verschiedenen und häufig inhomogenen Materialien ist vor dem Einsatz in diversen hochtechnologischen verfahrenstechnischen Prozessen dringend eine Konfektionierung notwendig. Eine moderne Aufbereitungstechnik kann die Effizienz der Prozesse und die Produktausbeute deutlich steigern.

Für die Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe sind eine Vielzahl von Verfahren notwendig, um die Materialien in ihrer Partikelgröße zu reduzieren bzw. ihre spezifische (reaktive) Oberfläche zu vergrößern, bestimmte Fraktionen zu isolieren und aufzuschließen und mit chemischen, chemisch-physikalischen und biotechnologischen Verfahren in Verbindung zu bringen.

Für lignocellulosehaltige Rohstoffe gilt, dass ihre Verwendung zurzeit ausschließlich auf die Gewinnung von Zellstoff und nicht auf die weitere Nutzung der Inhaltsstoffe ausgerichtet ist. Holz und auch Stroh sind eine der wichtigsten in Deutschland vorkommenden lignocellulosehaltigen Rohstoffe. Sie bestehen je nach Holz- oder Strohart aus ca. 40 – 50 % Cellulose, 20 – 30 % Hemicellulose, 20 – 30 % Lignin und 2 – 6 % weiteren Inhaltsstoffen. Um diese Bestandteile technisch nutzbar zu machen, sind neue innovative Systemlösungen erforderlich [11][20]. Zur Aufbereitung dieser Rohstoffe sind integrierte Prozesse zu entwickeln, die neben der hochwertigen Nutzung der Kohlenhydrate auch eine Separation und spätere Nutzung der aromatischen Polymere Lignin oder Tannin ermöglichen. Zu Beginn der Aufbereitungskette steht der Prozess der Zerkleinerung. Durch Zerkleinerungsprozesse kann die Rohstoffeffizienz infolge einer deutlich größeren spezifischer Oberfläche und Strukturveränderungen signifikant gesteigert werden [24]. Je nach Holzart oder für Stroh muss der Zerkleinerungsprozess speziell konzipiert oder modifiziert werden. Es können sowohl Nass- als auch Trockenzerkleinerungsprozesse eingesetzt werden. Des Weiteren sind dann entsprechende Klassier- und Sortierprozesse für die bezüglich der Form stark irregulären Partikel zur Verfügung zu stellen und neue Methoden für die Charakterisierung dieser nachwachsenden Rohstoffe zu entwickeln, so dass die Partikel messtechnisch erfasst werden können und die Aufbereitungsprozesse im industriellen Maßstab steuerbar sind.

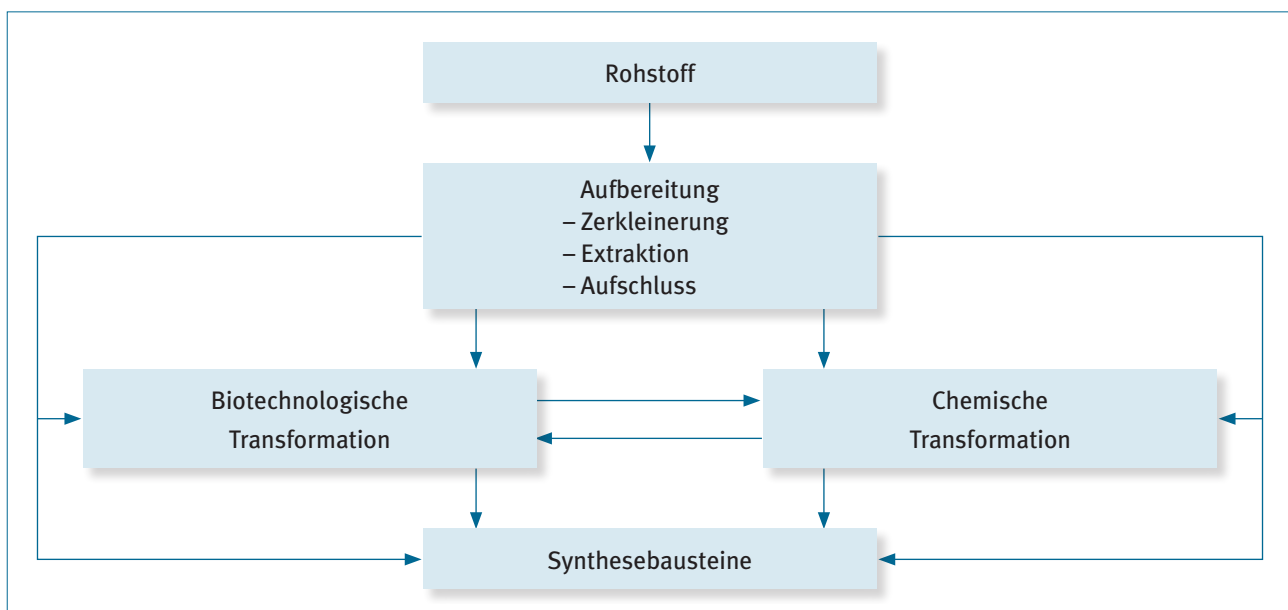


Bild 5: Typische Prozesskette der Aufbereitung und Weiterverarbeitung (Veredelung) nachwachsender Rohstoffe

Als weiteren Schritt der Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe ist die Trennung bzw. Isolierung von bestimmten Inhaltsstoffen durch Extraktionsverfahren, chromatographische Verfahren oder Filtration durchzuführen. Um aber das Produktspektrum der Inhaltsstoffe, z. B. in lignocellulosehaltigen nachwachsenden Rohstoffen, deutlich zu erweitern, muss ein physikalisch-chemischer Aufschluss durch Pyrolyse oder ein chemischer Aufschluss mit ionischen Flüssigkeiten, durch Hydrolyse, hydrothermale Verfahren, überkritische Fluide oder einfacher durch Verfahren wie Aquasolv- oder Organosolv-Prozesse und im Anschluss eine Ligninfällung erfolgen [1][9][15][6]. Auch biotechnologische Ansätze zur Herstellung höherwertiger Verbindungen oder zum Aufschluss sind denkbar.

Beispielsweise wird bei dem Organosolv-Prozess eine Suspension aus Alkohol und Wasser und der lignocellulosehaltigen Biomasse in einem Temperaturbereich von ca. 150 – 200 °C bei ca. 20 bar aufbereitet. Hierbei werden die Hemicellulose zu C₅ und C₆-Zuckern abgebaut und das Lignin aus der Matrix entfernt. Je höher der Grad der mechanischen Aufbereitung im Vorfeld der chemischen Aufbereitung war, desto besser ist die Ausbeute an Lignin in diesem Prozess und die Zugänglichkeit für die anschließende enzymatische Hydrolyse.

Algen sind aufgrund ihrer wertvollen Inhaltsstoffe ein weiterer interessanter nachwachsender Rohstoff. Sie enthalten große Mengen an wertvollen Proteinen, mehrfach ungesättigten Fettsäuren, Ölen, natürlichen Carotinoiden und Vitaminen. Dies macht sie zu interessanten Rohstoffen für die Nahrungsmittelindustrie, für Kosmetik, Pharmazie, Chemie und die Bioenergiebranche. Die Algenforschung steht derzeit noch am Anfang der Entwicklungen. Auch in diesem Bereich müssen neben der Kultivierung der Algen für die Aufbereitung dieser Rohstoffe noch nachhaltige Konzepte entwickelt werden.

Handlungsbedarf Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe:

Insgesamt fordert die Aufbereitung nachwachsender Rohstoffe neue Konzepte zur Verarbeitung von Materialien mit deutlich veränderten Produkteigenschaften oder eine Modifizierung und Anpassung bekannter Prozesse der Verfahrenstechnik und der Technischen Chemie an diese prozesstechnisch anspruchsvollen Rohstoffe.

4.4. Recycling

Das Recycling, aktuell auch als „Urban Mining“ bezeichnet, beinhaltet den Aufwand zur Rückführung sekundärer Rohstoffe in den wirtschaftlichen Kreislauf und schließt damit neben der Erkundung der sekundären Lagerstätten auch deren Gewinnung sowie die Aufbereitung zu marktfähigen Produkten ein. Das Recycling ist damit in der Lage, einen gewissen Anteil primärer Rohstoffe durch sekundäre zu substituieren (Recyclingrate). Bedingt durch die hohe Werthaltigkeit der Metalle (Wertstoffgehalte, Börsenpreise) funktioniert dieser energiesparende Kreislauf im Bereich Eisen und Stahl sowie der NE-Metalle (Al, Cu, Zn u.a.) vergleichsweise gut. Im Rahmen der Aufbereitung der Schrotte und metallhaltigen Abfälle können so bereits heute relativ hohe Recyclingquoten (Anteil der stofflichen Verwertung) nachgewiesen werden. Da allerdings überwiegend nach wirtschaftlichen Aspekten geurteilt wird, sind die Grenzen des Recyclings für die Privatwirtschaft klar definiert. Neben den ökologischen Grenzen (Verbrauch an Primärressourcen unvertretbar hoch), den technischen Grenzen (geeignete Rückgewinnungsszenarien fehlen; unzureichende Sekundär-Produktqualitäten) sind es insbesondere die ökonomischen Grenzen (Aufbereitungskosten und Kosten für Abproduktentsorgung → Sekundärprodukterlöse), die die Möglichkeiten des Recyclings maßgeblich einschränken. Analog zu den primären Rohstoffen gibt es immer dann Probleme mit der Wirtschaftlichkeit, wenn Sekundärrohstoffe

- » mit hohen Wertstoffgehalten, aber in zu geringen Mengen
- » in großen Mengen, aber mit zu geringen Wertstoffgehalten
- » in komplexer Zusammensetzung (Massen- und Spurenmetalle)
- » mit extremen Verwachsungsgraden (z. B. als Werkstoffverbunde)
- » bzw. zusätzlich in Verbindung mit Stör- bzw. Schadstoffen

vorliegen.

Von diesen Schwierigkeiten sind allerdings nicht nur die Aufbereitungsprozesse des Recyclings betroffen, sondern insbesondere auch die flankierenden Prozesse Erkundung und Gewinnung (mit „Logistik“) sowie die Entsorgung der Reststoffe. Hinzu kommt außerdem, dass das Recycling der sekundären Rohstoffe im Gegensatz zur Primärrohstoffherzeugung mit extrem verschärften Umweltauflagen konfrontiert ist.

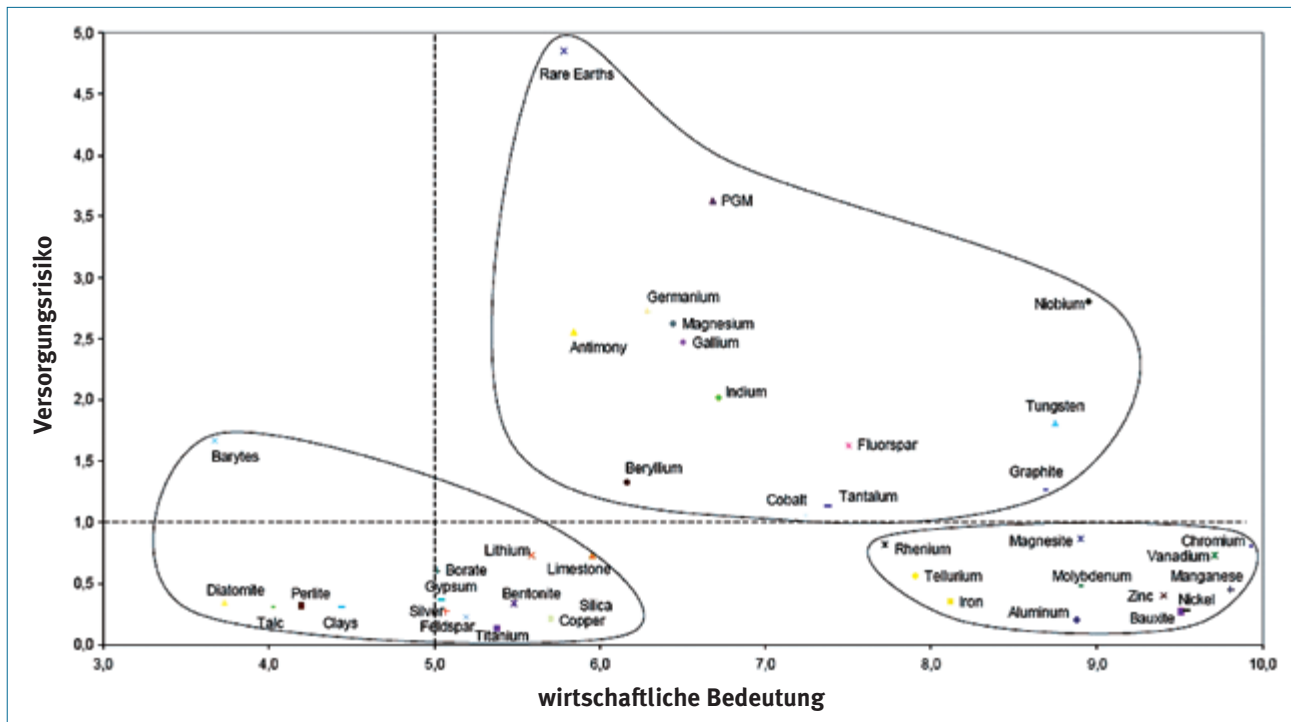


Bild 6: Darstellung des Versorgungsrisikos von Rohstoffen zur Evaluierung kritischer Rohstoffe (EU-Kommission „Raw Materials Supply Group“ Juni 2010, [4])

Auf Grund der protektionistischen Maßnahmen einiger weniger, aber maßgeblicher Rohstoffherzeuger (z. B. China) rückt aktuell das Recycling der strategischen Seltenerd- bzw. Edelmetalle sowie anderer hochwertiger mineralischer Rohstoffe (Bild 6) in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Entsprechende nationale Aktivitäten wurden vor wenigen Jahren mit dem Hinweis auf die unproblematische Verfügbarkeit der erforderlichen Mengen zu niedrigen Preisen unterlassen. Mit der künstlichen Verknappung dieser Ressourcen und der daraus resultierenden Preiserhöhung, die zudem bedarfsseitig durch die sog. „grünen Technologien“ (z. B. Elektromobilitäts-Initiative, Regenerative Energien, Energiespartechiken) weiter getrieben wird, verschieben sich gleichzeitig die Grenzen der Wirtschaftlichkeit der Wertstoffrückgewinnung aus den sekundären, auch in Deutschland verfügbaren Rohstoffen: d.h. die Rückgewinnung auch weniger wertvoller bzw. Spurenelemente wird unter gewissen Randbedingungen lohnender.

Im Gegensatz zu den Primärrohstoff-Vorkommen ist die „Lagerstätte“ Deutschland aber durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet, die in der Primärrohstoffgewinnung und -aufbereitung so z.T. nicht bekannt sind und ein „Urban Mining“ erschweren dürften:

- » extreme Vielfalt extrem komplex zusammengesetzter, feinst-strukturierter Verbunde aus Massenmetallen,

Seltenerd- und Edelmetallen in Beschichtungen/Legierungen und Schadstoffen, deren weitestgehend unbekannt stoffliche Zusammensetzung sich fortwährend verändert (technischer Fortschritt)

- » extreme Vielfalt an Partikelgrößen und -formen
- » extrem große Anfallflächen → spezielle Erfassungssysteme, Logistik erforderlich
- » regional, saisonal bedingte Einflüsse auf Wertstoffgehalte und stoffliche Zusammensetzung
- » Anfallcharakteristik (Menge, Zusammensetzung) durch objektive (z. B. Nutzungsdauer) und subjektive Parameter (z. B. Althandy-Hortung) beeinflusst
- » überwiegend mittelständige Recyclingwirtschaft → Kanalisierung der Wertstoffströme
- » viele Bewerber um werthaltige Abfallkategorien → bestehende Entsorgungsstrukturen, Verdrängungswettbewerb
- » Wirtschaftlichkeitsgebot lässt nur dem aktuellen Wertinhalt entsprechende Aufbereitungstiefe zu
- » Reglementierung der Aufbereitung durch Umweltgesetzgebung (Schadstoffgrenzwerte) und Abnehmer (strenge Qualitätsvorgaben für Recyclingprodukte)

Diese besonderen Aspekte des Recyclings (Erfassung, Gewinnung, Aufbereitung, Metallurgie) der Sekundärrohstoffe sind zukünftig forschungsrelevant [5].

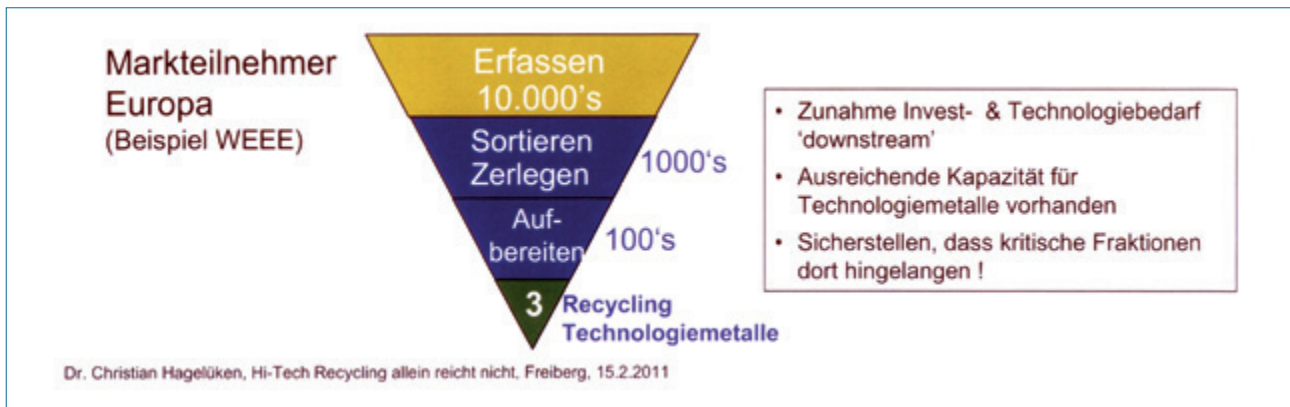


Bild 7: Struktur der Recyclingwirtschaft nach Hagelüken [3]

Der Recyclinggesamtprozess von der Sammlung bis zur Metallurgie ist nach *Hagelüken* [3] in der Form einer Pyramide aufgebaut (Bild 7), in der der dunkel unterlegte Bereich das Arbeitsgebiet der mechanischen Aufbereitungsprozesse ist. Dieses ist dominiert von kleinen und mittelständischen Unternehmen. Die wissenschaftlich-technologische Durchdringung der angewendeten Prozesse hat in Deutschland einen vergleichsweise hohen Entwicklungsstand erreicht. Dieses Potential kann aber nur zu einem Bruchteil ausgeschöpft werden, da die anliegenden Stoffströme den Marktgegebenheiten unterliegen, d.h. weder repräsentativ, noch zeitlich konstant, noch prinzipiell einfach zu verallgemeinern sind. Die Stoffströme sind mit einem zeitlichen Verschiebungsfaktor eine Funktion der Industrieproduktion und deren Innovationszyklen sowie des Verbraucherverhaltens. Somit müssen Recyclinglösungen schnell am Markt sein und sind nur für ein bestimmtes Zeitintervall gültig, bzw. müssen einem kontinuierlichen Verbesserungs- und Anpassungsprozess unterliegen.

Das Recycling makroskopischer Strukturen größer ca. 1-10 mm ist in Deutschland hoch entwickelt und hat mit der Etablierung von sensorgestützten Prozessen eine hohe Selektivität und Automatisierung erreicht. Im Bereich der Aufbereitung feiner und feinsten Verbundstrukturen ist immer noch ein großer Entwicklungsbedarf zu registrieren. Beispielsweise besitzen die in der Elektronik verwendeten Edelmetallschichten aus CVD oder elektrolytischen Verfahren eine Dicke im Bereich einstelliger Mikrometer. Solche Komponenten aus komplexen Elektro-

und Elektronik-Schrotten des Informationszeitalters zu detektieren, freizulegen und zu entfernen, ist eine extrem anspruchsvolle Aufgabe. Elektronische Bauelemente wie Leiterplatten, Mobiltelefone, Autoelektronik oder Laptop-Computer sind letzten Endes vergleichbar mit polymetallischen Erzen mit hohen Metallgehalten und sehr hoher Komplexität. Ein großer Teil der Metalle könnte zwar bereits heute durch rein metallurgische Verfahren zurückgewonnen werden, jedoch ist der energetische Aufwand dieser thermischen Prozesse z.T. noch unverträglich hoch. Mit weiter steigenden Energiepreisen wird sich dieses Problem zukünftig nicht gesichert entschärfen lassen. Deutlich bessere Möglichkeiten bietet hier die Nutzung einer gezielten Voranreicherung durch eine selektive Sammlung bzw. Erfassung vergleichbar zusammengesetzter Güter sowie von speziell angepassten Aufschlusszerkleinerungs- und Sortierprozessen. Durch eine perfekte Abstimmung der Teilprozesse der Aufbereitungsverfahren auf die jeweiligen Aufgabegüter lassen sich entsprechende Reserven bezüglich der Produktqualitäten bzw. des Wertstoff-Ausbringens erschließen, wodurch der Aufwand „downstream“ in der Metallurgie verringert werden kann.

Handlungsbedarf Aufbereitung sekundärer Rohstoffe:

Das mechanische Recycling (Sortier- und Aufschlussverfahren) muss in den Bereich der charakteristischen Längen (> 1 µm) aktueller hochtechnologischer Geräte vordringen. Die Logistik der Sammlung bestimmt die vorzusehende Anlagengröße.

5. Verfahrenstechnischer Beitrag

Es wird aktuell und zukünftig in vielen konzertierten internationalen Forschungsausschreibungen [17] im Bereich Mineral Processing ausdrücklich gefordert, neue, innovative Technologien und Apparate für eine Pilotierung im Sinne eines Demonstrators bereit zu stellen. Abgesehen von Transfertechnologien besteht bei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in Deutschland zumindest hochschulseitig noch Nachholbedarf. Es müssen mit einer ingenieurtechnisch-grundlegenden Forschung und Entwicklung auf Basis der aktuellen rohstofftechnischen und -politischen Randbedingungen neue Technologien erst aufgebaut werden, um dann mit der geforderten Breite in die Anwendungsforschung gehen zu können.

Die Innovationsbereiche ergeben sich auf Basis der o.g. Fragestellungen. Als prinzipielle Spezifikation kann abgeleitet werden, dass feine bzw. feinste Partikelsysteme aus den jeweiligen Erzen, sekundären Rohstoffen und auch nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden müssen. Anschließend erfolgt die Sortierung und Aufkonzentrierung; Neben- und Störstoffe müssen abgetrennt und deren Handhabungseigenschaften eingestellt werden. Hierbei ist bei Erzen und sekundären Rohstoffen die Schnittstelle sowohl zur Gewinnung als auch zur Metallurgie und bei nachwachsenden Rohstoffen zur biotechnologischen oder chemischen Transformation fließend bis überlappend.

Für alle im Hinblick auf Erze genannten Prozesse sind die typischen Randbedingungen der mineralischen Prozesstechnik zu berücksichtigen:

- » Große Massenströme
- » Robuste automatisierbare Prozesse
- » Nicht vollständig sensorisch erfassbare Materialeigenschaften
- » Wechselnde und einzigartige Eigenschaften der jeweiligen Lagerstätte (Problem der Definition von Modellprodukten)
- » Vorhandensein von nicht genutzten Stoffströmen und deren nachhaltige Entsorgung (Berge)

Für nachwachsende und sekundäre Rohstoffe sind typische Randbedingungen:

- » Kleine bis mittlere Massenströme unterschiedlichster Herkunft (Problem der Zusammenführung der Massen über teilweise größere Entfernungen durch möglichst intelligente Logistik)
- » Bei sekundären Rohstoffen sehr heterogene Materialien, bei nachwachsenden Rohstoffen hohe Biovariabilität

5.1. Mechanische Verfahrenstechnik: Zerkleinerung/Klassieren

Die Prozesse Zerkleinern und Klassieren (d.h. Trennen nach der Partikelgröße) spielen bei der Aufbereitung der primären, sekundären und nachwachsenden Rohstoffe eine sehr wichtige Rolle, da sie am Anfang der Prozesskette stehen und damit die Effizienz der nachfolgenden Prozessschritte maßgeblich beeinflussen. Zudem ist die

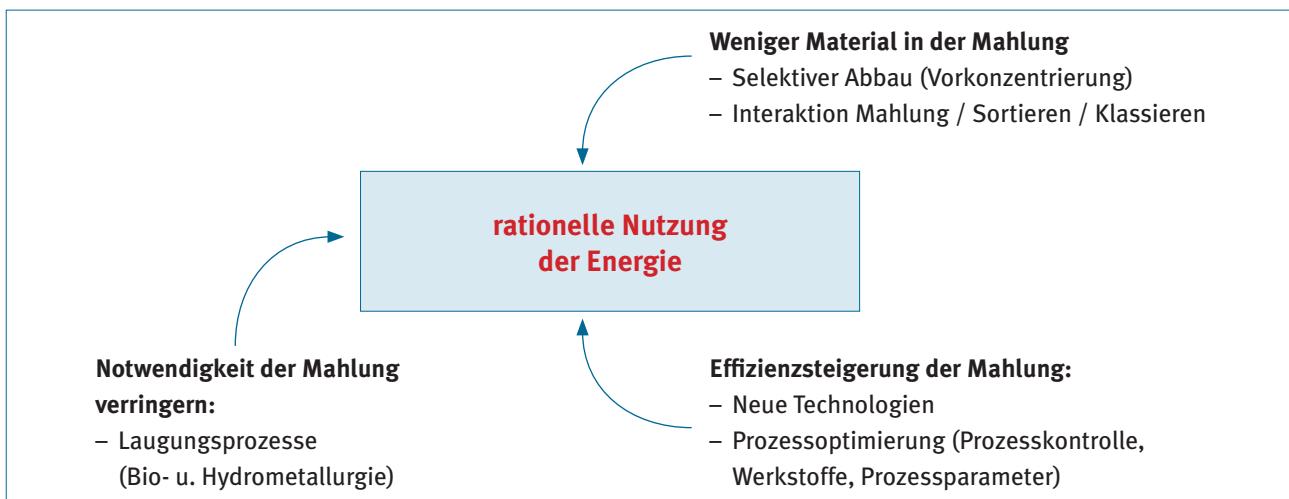


Bild 8: Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Zerkleinerung (schematisch nach MIFU Report 11/2010 [10])

Zerkleinerung einer der Hauptkonsumenten der Primärenergie bei der Aufbereitung. Sehr deutlich wird dies zum Beispiel bei den hohen Massenströmen in der Aufbereitung von Erzen. Ziel muss sein, hier eine Effizienzsteigerung zu erreichen. Verschiedene prinzipielle Strategien sind in Bild 8 dargestellt. Hierbei handelt es sich um prozesstechnische Alternativen („Sprung auf ein anderes Prinzip“), die Verringerung der zu verarbeitenden Stoffströme und die Effizienzsteigerung („Prozessintensivierung“) der Mahlung selbst. Ein sehr gutes aktuelles Beispiel für eine erfolgreiche Effizienzsteigerung ist die Integration von Gutbettwalzenmühlen [28][27] (High Pressure Grinding Rolls), eine in Deutschland entwickelte und nahezu ausschließlich von deutschen Firmen vertriebene Technologie, in die Prozesskette der Erzaufbereitung. Ähnliche Ansätze sind bei sekundären und nachwachsenden Rohstoffen zu verfolgen, wobei insbesondere für die Feinstzerkleinerung nachwachsender organischer Rohstoffe neue effektivere Zerkleinerungsprozesse zu entwickeln sind.

Verfahrenstechnische Aufgaben im Bereich Zerkleinern und Klassieren sind:

- » Forschung und Entwicklung zu energieeffizienten Zerkleinerungstechniken bei hohen Durchsätzen und hohen Feinheiten (bis ca. 1 µm)
 - Grundlagen- und angewandte Forschung zum Bruch und zur Feinstzerkleinerung (unterhalb von 100 µm) von
 - heterogenen Partikelstrukturen (z. B. Erzen, Sekundärmaterialien)
 - nicht-spröden organischen Materialien
 - Mehrstoffsystemen (z. B. hart und weich)
 - faserigen Materialien
 - Beeinflussung der Brucheigenschaften durch Vorbehandlung, z. B. thermisch oder chemisch
 - Modellbasierte Beschreibung des Bruch- und Zerkleinerungsverhaltens komplexer Materialien (Multi Component Population Balance)
 - Neue Zerkleinerungs- und Klassiertechnologien bzw. Mühlen- und Klassierertechniken mit höherer Energieeffizienz, unter anderem durch
 - besseres Verständnis der Vorgänge in Mühlen mittels integrierter Messtechnik (z. B. Druckverteilung auf Zerkleinerungswerkzeugen)
 - Reduzierung der Anzahl der Zerkleinerungsschritte
 - verstärkter Einsatz von Nassmahlung in der Aufbereitung
- Neuartige Kombinationen von Mühlen und Klassierern, insbesondere zur Erzielung enger Partikelgrößenverteilungen
- Verständnis der Dynamik von Mühle-Sichter-Kreisläufen und darauf aufbauend Entwicklung neuer Regelstrategien für die Interaktion von Zerkleinerung und Klassierung
- Reduzierung von Abfallstoffen durch gezielte Beanspruchung der Materialien (u.a. Vermeidung von Feinstpartikeln bei trockener Aufbereitung)
- Integration weiterer Prozesse wie Laugung, Extraktion oder Reaktionen mit der Zerkleinerung in Mühlen
- Vorhersage von Materialanhaftungen in Mühlen und Klassiermaschinen und Vermeidungsstrategien
- Einsatz von Mahlhilfsmitteln zur Verschiebung der Mahlgrenzen und Reduzierung von Anbackungen
- Fundiertes Verständnis und Minimierung des Mühlenverschleißes
- » Entwicklung von effizienten Klassierverfahren als Sortierung
 - Simulation der Partikelbewegung in komplexen hochbeladenen Gas- und Flüssigkeitsströmungen (dichte Mehrphasenströmung)
 - Entwicklung neuartiger Klassierverfahren für
 - faserige Partikel
 - Partikel kleiner 10 µm
 - Sortierung mit hoher Trennschärfe bei enger Partikelgrößenverteilung
 - gezieltes Ausschleusen angereicherter Partikelfractionen aus Kreisläufen.
 - Kombination von selektiver Zerkleinerung und Klassierung als Sortierprozess
- » Grundlagenkenntnisse und Prozesswissen zur selektiven Zerkleinerung und Aufschlusszerkleinerung von komplexen technischen Strukturen (Werkstoffverbunden) und nachwachsenden Rohstoffen:
 - Metall-Metallkompositen (Hybridbauteile)
 - Polymer-Metallkompositen [14]
 - Polymer-Faserkompositen (MFK, NFK, GFK, CFK)
 - Biomaterialien (z. B. Holz)
 - technische Schichtstrukturen zur Entschichtung (CVD-Schichten, Coatings, Elektroden) in der Regel bei minimalem Feingut der Trägerstruktur

Forschungsbedarf Zerkleinerung/Klassieren:

- Zerkleinerung:**
- Beeinflussung von Stoffeigenschaften
 - Verkürzung der Prozessketten der mechanischen Aufbereitung
 - Energieeffizienter Einsatz der Nassmahlung
 - Feinzerkleinerung nicht-spröder und faseriger Materialien
 - Selektive Zerkleinerung heterogener Materialien (insb. Komposite)
- Klassieren:**
- Klassierung von feinsten Partikeln und Fasern
 - Neue Verschaltungen und Regelstrategien für Mühle-Klassierer-Kreisläufe

5.2. Mechanische Verfahrenstechnik: Sortieren

Das Sortieren ist die Kernaufgabe der Aufbereitungstechnik - Berge muss vom Erz getrennt werden. Hierfür gelten klassisch die charakteristischen Qualitätsparameter Ausbringen und Reinheit bzw. Wertstoffgehalt. Zusätzlich dazu kann man noch weitere sekundäre Qualitätsmerkmale definieren. Der Gehalt an bestimmten Störstoffen erhält hierbei einen besonderen Stellenwert. Prinzipiell kann das Sortieren nur funktionieren, wenn die einzelnen Partikel gegeneinander beweglich sind, d.h. weder im Erzverbund noch in Agglomeraten enthalten sind. Je nach Sortierkriterium kommt der entsprechende Sortierprozess zum Einsatz. Trockene Sortierverfahren, Magnetscheidung, Elektrostatisches Sortieren, Dichtesortierung kommen bei ca. 50-100 µm an eine technische Grenze, da hier die v. d. Waals-Kräfte heterogene Agglomerate formen.

Im Feinbereich und zur Erhöhung der Selektivität, wenn sich die Mineralbestandteile nicht ausreichend in magnetischen oder Ladungseigenschaften oder Dichte signifikant unterscheiden, findet eine nasse Sortierung statt. Dies kann eine Dichtesortierung, Magnetscheidung oder Flotation sein.

Aus der Notwendigkeit des höheren Aufschlussgrades, d.h. feinere Partikelsysteme werden erzeugt, ergibt sich:

- » Sortierverfahren für feinste Partikelsysteme bei sehr feinem Aufschluss (< 50µm, vorzugsweise im Bereich 0,1-10 µm)
- » Unterstützen des Sortierens durch Klassierprozesse Sortieren in engen Korngrößenfraktionen
- » Strategien zum Handling von Rohstoffen mit einem erhöhten Anteil an Störstoffen (Tone, organische Bestandteile, radioaktive Substanzen)

Für trockene Sortierverfahren kann festgestellt werden:

- » Ausweitung des Arbeitsgebiets Sensor unterstützter Sortierung [2] (Größenbereich, Anwendungen).
- » Sortieren von heterogenen Stoffströmen (Recycling)
- » Erweiterung des Anwendungsbereiches trockener magnetischer und elektrostatischer Sortierverfahren durch Erhöhung der Gradienten, Verbesserung des Transports und Beeinflussung der Partikelhaftung.

Für nasse Sortierverfahren, insbesondere die Flotation, kann festgestellt werden:

- » Steuerung der Hydrodynamik in großen Flotationsapparaten Erhöhung der Trefferwahrscheinlichkeit Blase-Partikel
- » Druckentspannungsflotation auf verschiedenen Druckniveaus
- » Apparative Entkopplung von Blasenenerzeugung von Kontaktbereich Blase-Partikel.
- » Systematische Untersuchungen zu den beteiligten Grenzflächen (siehe Grenzflächen-Verfahrenstechnik)

Forschungsbedarf Sortieren:

- » Partikelsysteme < 10 µm – Kontrolle der Partikel-Partikel-Interaktionen
- » Beeinflussung der Trennmerkmale zur Erhöhung der Selektivität [25]
- » Vergrößerung des Anwendungsbereichs von Sortierprinzipien

5.3. Mechanische Verfahrenstechnik: Mechanische Trenntechnik

Die Notwendigkeit feiner aufschließen zu müssen, zieht auch das vollständige Handling feiner Stäube und Suspensionen mit sich. Während die Fragestellungen der Gasreinigung noch in den Stand der Technik fallen, besteht ein hoher Bedarf für den Einsatz effektiver Prozesse der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung:

- » Handling von feinen und feinsten Konzentrat- und Berge-Suspensionen
- » Konzepte und Prozesslösungen für dry tailings, d.h. die Erzeugung deponierbaren Feststoffs aus den Tailingsuspensionen [19].
- » Verarbeitungen von stark bimodalen Feststoffsystemen (bspw. Tonanteil im Rohstoff)
- » Systematische Untersuchungen zum Entschlännen und Läutern.
- » Reinigung der Berge- und der Wertstofffraktion von Hilfsstoffen (Entfeuchten/Waschen)
- » Erhöhung der Ausbeute von Laugungsprozessen durch Filterkuchenwaschung
- » Wassermanagement / Rückgewinnung der Bergbauchemikalien
- » Systematische Untersuchungen zu den beteiligten Grenzflächen (siehe Grenzflächenverfahrenstechnik)
- » Mechanische Trenntechnik bei erhöhtem Druck- und Temperaturniveau

Forschungsbedarf Trenntechnik:

- Waschung:**
- Verringerung der organischen und gelösten ionischen Last von Bergeströmen (sekundäre Anwendungen)
 - Erhöhung der Ausbeute (Hydromtallurgie)
- Entfeuchtung:**
- Kontrolle der Handlingeigenschaften – Deponierbarkeit, Hohe Feinanteile /
 - Biomodale Partikelgrößenverteilungen (Tonminerale)

5.4. Bioverfahrenstechnik

Biologische Prozesse sind in der Mineralaufbereitung durchaus bekannt und werden, sofern geeignet, auch angewendet. Im Vordergrund steht in der Anwendung die biologische Laugung, die einen erheblichen Anteil an der Gesamtproduktion von Kupfer besitzt. Erste Anwendungen gibt es auch für Nickel und Uran. Als aktuelles Schlagwort ist in diesem Zusammenhang der Begriff „Geo-Bioverfahrenstechnik“ geprägt worden. Unter diesen fallen:

- » Bioleaching (bereits technologisch für Cu eingeführt)
 - Erweiterung auf weitere Wertmetalle
 - Grundlegende Untersuchungen
 - Prozessmodellierung und Optimierung
 - Integration in konventionelle Prozessschritte (Handling Prozesswasser, Extraktion, Tailings..)
- » Biologische Abwasserbehandlung (Sulfate...)
- » Biomineralisation
 - Überführung von gelösten Substanzen in einen möglichst reinen Feststoff durch Mikroorganismen
- » Nutzung von biotechnologisch synthetisierten Materialien bzw. Substanzen
 - Selektive Adsorbentien aus S-Layer-Proteinen
 - Biotenside [26]
 - Bio-Komplexanten
- » Biotechnologische Transformation nachwachsender Rohstoffe

Forschungsbedarf Bioverfahrenstechnik:

- Bioleaching:**
- Selektive Mobilisierung der Metallionen für gering konzentrierte Co-Elemente
 - Erweiterung des Anwendungsfeldes für Bioleaching auf weitere Hauptelemente
- Biomaterialien:**
- Tenside, Extraktionsmittel, Flockungsmittel aus nachwachsenden Quellen

5.5. Grenzflächenverfahrenstechnik

Der zentrale Sortierprozess der Aufbereitung ist die flotative Trennung, deren Sortierkriterium die unterschiedlichen Adsorptions- und daraus resultierenden Benetzungseigenschaften an den Oberflächen der Rohstoffpartikel ist. Im Mittelpunkt steht der Dreiphasenkontakt Gasblase/Wässrige Suspensionsflüssigkeit/Feststoff. Die Oberflächen- bzw. Grenzflächeneigenschaften des Feststoffs werden durch Zugabe von grenzflächenaktiven Substanzen und die Anpassung von pH-Wert und Ionenstärke modifiziert. Sammler verringern die Benetzbarkeit, Drücker erhöhen diese, Schäumer sorgen dafür, dass oberhalb der Suspension ein stabiler Schaum entsteht, mit dem der Feststoff ausgetragen werden kann. Die Interaktion zwischen einer komplexen mineralischen Grenzfläche und ei-

ner grenzflächenaktiven Substanz (Tensid, Polyelektrolyt, Polymer, Komplexbildner,...) kann auch aktuell nicht vollständig beschrieben werden. Die Entwicklung von gezielt wirkenden Flotationsreagenzien ist verbunden mit einem molekularen Design entsprechender aktiver Moleküle. Grundlegende Entwicklungsthemen wären:

- » Theoretische Vorhersage der Interaktion von Flotationschemikalien mit mineralischen Grenzflächen, bspw. über Methoden des „molecular modelling“.
- » Entwicklung von selektiven Flotationschemikalien für oxidische Erze

Die Verfügbarkeit verschiedener als Flotationsmittel eingesetzter Massenchemikalien nimmt durch die technologischen Entwicklungen der chemischen Industrie (Ver-



Bild 9: Flotationszelle in der Erzaufbereitung (Clariant)

änderung von Produktionsprozessen, Beendigung der Produktion, Aspekte der REACH-Zertifizierung) und durch einen verantwortungsvolleren Umgang mit Prozesschemikalien im allgemeinen ab. Im Einklang mit dieser Transformation der chemischen Produktion sind neue Quellen und neue Stoffgruppen von Bergbauchemikalien erforderlich. Das heißt:

- » Entwicklung und/oder Verfügbarmachung neuer Bergbauchemikalien (Flotationsmittel, Flockungsmittel, Extraktionsmittel) unter besonderer Berücksichtigung der Nachhaltigkeit.
- » Frage nach der Eignung von Teilstoffströmen aus der industriellen Biotechnologie für Flotationsanwendungen, bspw. Biodiesel (Polyglucane, Oligo- und Polysaccharide)
- » Rückgewinnung und Kreislaufführung der Flotationsreagenzien
- » Reinigung des Feststoffs von Flotationsreagenzien (Minimieren der organischen Fracht)

Über die Anwendung im Bereich des Bergbaus ist der Einsatz der Flotation zur Sortierung feinsten Partikel sekundärer oder nachwachsender Rohstoffe zu entwickeln und zu untersuchen.

Forschungsbedarf

Grenzflächenverfahrenstechnik:

- » Grundlagen zur Auswahl und zum Design von Bergbaureagenzien
- » Wechselwirkung der Mineralstruktur mit funktionellen organischen Gruppen
- » Möglichkeiten zur Beeinflussung der Grenzflächenenergie von Mineralien

5.6. Extraktion und Chromatographie

Verlässt man den Fokus der Mechanischen Verfahrenstechnik sind auch weitere Prozesse mit Innovationspotential zu betrachten. Hierzu zählen:

- » Ionentausch
- » Funktionsoberflächen, bspw. Membranadsorber
- » Extraktion über organische Phasen
- » Affinitätschromatographie

Deutsche Chemieunternehmen bieten in diesem Bereich den Stand der Technik an und sind auf dem Weltmarkt vertreten. Für neue, innovative, integrierte Prozesslösungen muss die Anreicherung durch Extraktion, Laugung und Ionentausch gemeinsam mit den primär mechanischen Prozessschritten gesehen werden.

Affinitätsverfahren werden zukünftig stärker in den Fokus rücken, wenn polymetallische Lagerstätten, die kein wirkliches Hauptmetall enthalten, das in einer um mindestens eine Größenordnung höheren Konzentration vorliegt, aufbereitet werden. Dann ergibt sich die Fragestellung, dass nach einem Laugungsprozess aus einer polyionischen Lösung mehrere Metalle selektiv gewonnen werden müssen. Neben Kristallisation und Elektrolyse kann eine Extraktion entweder als Flüssig-Flüssig- oder als Flüssig-Fest- Prozess angestrebt werden. Das Trennprinzip ist in beiden Fällen eine möglichst selektive Komplexbildung eines Ions durch amphiphile organische Moleküle. Technologische Herausforderungen hierbei sind:

- » Entwicklung von Chromatographiematerialien zur selektiven Trennung von Metallionen
- » Entwicklung von Nano-Kompositen mit hoher spez. Oberfläche als selektive Adsorbentien
- » Betrieb von Chromatographiesäulen zur selektiven Abtrennung von Ionen aus hydrometallurgischen Lösungen
- » Prozessführung und Gestaltung von adsorptiven Trennungskonzepten für polyionische Lösungen
- » Überprüfung der Eignung von alternativen Prozessen zur Adsorption bspw. von Wirbelbettadsorbern („expanded bed adsorption“) für den Betrieb mit feststoffhaltigen Lösungen aus der Hydrometallurgie.

5.7. Alternative und Hybride Prozesse

Über die Betrachtung von konventionellen Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik hinaus, sind perspektivisch neue, hybride, ggf. bereits in der chemischen Massenproduktion eingeführte und erprobte Technologien auf ihre Anwendbarkeit im Sinne eines „Sprung auf ein anderes Prinzip“ zu überprüfen. Hierzu zählen:

- » Hybride, bzw. integrierte Prozesse
- » Dampf-Druckfiltration
- » Reaktionsmahlung

- » Selektive Magnetseparation
- » Prozesse mit überkritischen Medien
- » Hochdruckprozesse
- » Plasma- und Hochspannungsprozesse

5.8. Prozesstechnik

Aufbereitungsprozesse zeichnen sich dadurch aus, dass große Massenströme mit relativ hohem Aufwand verarbeitet werden. Geringe Schwankungen bzw. Verbesserungen in der Qualität ermöglichen absolut gesehen erhebliche Leistungssteigerungen (Wirtschaftlichkeit, CO₂-Einsparung). Ein Aufbereitungsprozess ist darüberhinaus ein prozesstechnisch vernetzter Vorgang, bei dem die einzelnen Teilschritte mit ihrer Prozessfunktion wechselwirken. Um diese Wechselwirkungen beschreiben, quantifizieren und für eine Optimierung und Prozessintensivierung nutzen zu können, ist es notwendig den Gesamtprozess über eine erhöhte Anzahl von Leitgrößen abbilden zu können. Sowohl eine fundierte Fließschemasimulation (sowohl stationär als auch instationär) als auch eine verbesserte Erfassung partikeltechnischer Leitgrößen und deren Nutzung für Regelkonzepte können einen prozesstechnischen Mehrwert generieren. Im Sinne der Entwicklung einer intelligenten Mine und optimierter Aufbereitungstechniken sind folgende Entwicklungsansätze prioritär:

- » Prozessverständnis durch Simulation (Flow-Sheet Simulation für Feststoffprozesse)
- » Messtechnik für charakteristische Leitgrößen
- » Struktur-Eigenschaftsfunktion: Nutzung erweiterter Parameter, bspw. geologische, geotechnische, kristallographische Parameter als Leitgrößen für die Aufbereitung (Konzept der Geometallurgie)
- » Konzepte der Integration von Gewinnung und Teilen der Aufbereitung, z. B. für direktes Rückverfüllen untertage („near to face mineral processing“)
- » Konzeption und Prozessgestaltung mit semimobilen Gewinnungs- und Aufbereitungsanlagen im Tagebau

6. Zusammenfassung

Die mineralische Aufbereitungstechnik ist sowohl in der Ausbildung als auch technologisch die Grundwissenschaft aus der in den vergangenen ca. 100 Jahren die Verfahrenstechnik erwachsen ist. Der Strukturwandel in Deutschland ab den 1960er Jahren hat die wirtschaftliche Bedeutung der mineralischen Aufbereitung reduziert. Technologische Fortschritte in der Prozesstechnologie wurden immer stärker in andern Branchen zur Anwendung gebracht; hierzu zählen die chemische (Massen-)Produktion, das Recycling, die Umwelttechnik sowie die Biotechnologie. Das prinzipielle stoffsystemübergreifende Verständnis der verfahrenstechnischen Prozesse ist in Deutschland nach wie vor stark vertreten. Für eine Stärkung und Weiterentwicklung einer aufbereitungstechnischen Forschung

kann der Wissenstransfer aus vielen zurzeit etablierten Themenbereichen der verfahrenstechnischen Forschung genutzt werden. Das konkrete Stoffverständnis für Erze, Mineralien, Kristallstrukturen muss allerdings aus den Geowissenschaften kommuniziert werden. Eine Synthese des Prozessverständnisses der Verfahrenstechnik mit dem Materialverständnis der Geowissenschaften kann als eine zielführende Strategie für die Stärkung der Rohstoffgewinnung für Deutschland gesehen werden. Eine wichtige Brücke zwischen der Verfahrenstechnik und den Geowissenschaften stellen die verbliebenen Kapazitäten der aufbereitungstechnischen Forschung, aber auch der mechanischen Verfahrenstechnik in Deutschland dar.

7. Quellen

- [1] C. Arato, E. K. Pye, G. Gjennestad The lignol approach to biorefining of woody biomass to produce ethanol and chemicals *Appl. Biochem. Biotechnology* 121 (2005) 871 - 882
- [2] C. Fricke-Begetmann, P. Jander, H. Wotruba, M. Gaastra, Laser-based online analysis of minerals, *ZKG International* 63 (2010) 65-70.
- [3] C. Hagelücken, HI-Tech Recycling alleine reicht nicht, 1. Freiburger Ressourcentechnologie-Symposium, Freiberg, 2011.
- [4] Critical raw materials for the EU, DG Enterprise, Communication of the European Commission, Brussels, 2010.
- [5] D. Goldmann, Recycling, a contribution for safeguarding resources-new structural and technological challenges, *Recycling als Beitrag zur Rohstoffsicherung - neue strukturelle und technologische Herausforderungen* 82 (2010) 1851-1860.
- [6] D. Schmiedl, G. Unkelbach, J. Graf, R. Schweppe Studies in catalyzed hydrothermal degradation processes on Sulphur-free Lignin and extractive separation of aromatic SYNTHONs. *Proc.2nd Nordic Wood Biorefinery Conference (NWBC) 2009*, Helsinki, Finland, p.189-197
- [7] Directive 2009/28/EC - on the promotion of the use of energy from renewable sources
- [8] E.V. Verhoef, G.P.J. Dijkema, M.A. Reuter, Process knowledge, system dynamics, and metal ecology, *Journal of Industrial Ecology* 8 (2004) 23-43.
- [9] O. Faix, D. Meier, I. Grobe. Studies on isolated lignins and lignins in woody materials by pyrolysis-gas-chromatography-mass spectrometry and off-line pyrolysisgas chromatography with flame ionization detection. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 11 (1987), 403- 416
- [10] G. Bäckblom, E. Forssberg, S. Haugen, J. Johanson, T. Naarttijärvi, B. Öhlander, MIFU - Smart Mine of the Future, Rock Tech Centre, Lulea, 2010.
- [11] Gülzower Fachgespräche, Band 31: Stoffliche Nutzung von Lignin, 2009, Herausgeber Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow und Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucher-schutz (BMELV)
- [12] H. Kellerwessel, *Aufbereitung disperser Feststoffe*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [13] H. Schubert, *Aufbereitung fester mineralischer Feststoffsysteme*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1975.
- [14] H.G. Jäckel, H.G. Schubert, Removing metallic coatings from plastics and metals by mechanical processing, *Abtrennung metallischer Beschichtungen von Kunststoffen und Metallen mittels mechanischer Prozesse* 50 (2009) 4-19.
- [15] I. F. Cullis, J. N. Saddler, S. D. Mansfield Effect of Intial moisture Content and Chip Size on the Bioconversion Efficiency of Softwood Lignocellulosics *Biotechnology and Bioengineering* 85 (2004) 4, 413 – 421
- [16] J. Gutzmer, *Das Institut für Ressourcentechnologien in Freiberg*, 1. Freiburger Ressourcentechnologie-Symposium, Freiberg, 2011.
- [17] NMP.2012.4.1-1 New environmentally friendly approaches in minerals processing, European Commission,
- [18] P.R. Melcher, Konzeption eines Fördersystems zum Abbau von Manganknollen, *Forschung im Ingenieurwesen* 55 (1989) 16-31.
- [19] R. Bott, T. Langeloh, F. Meck, Continuous steam pressure filtration of mass mineral products, *Kontinuierliche Dampf-Druckfiltration von mineralischen Massenprodukten* 43 (2002) 19-30.
- [20] R. Ulber, R. Busch, Th. Hirth, A. Liese, S. Nordhoff, J. Puls, O. Pulz, D. Sell, C. Syldatk Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der industriellen Stoffproduktion, *Chemie Ingenieur Technik* (2006) 3, 219
- [21] R.L. Moss, E. Tzimas, H. Kara, P. Willis, J. Kooroshy, *Critical Metals in Strategic Energy Technologies*, JRC - scientific and strategic reports, European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport, 2011.
- [22] S. Dominy, *GeoMet 2011*, AusIMM Bulletin 76-78.
- [23] Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials, Communication of the European Commission, Brussels, 2011.
- [24] U. Teipel, H. Winter, G. Unkelbach, R. Schweppe, A. Gromov *Aufbereitung von nachwachsenden Rohstoffen durch Zerkleinerung*, *Chemie Ingenieur Technik* 81 (2009) 6, 759 - 766
- [25] V. Albrecht, E. Reinsch, U. Gohs, R. Schünemann, K. Husemann, F. Simon, Electrostatic separation of polyolefin mixtures, *Zur Elektrostatischen Trennung von Polyolefingemischen, Aufbereitungstechnik* 49 (2008) 26-34.
- [26] V. Vogt, E. Gock, W. Sand, *Sulfide Ore Flotation with extracellular polymeric Substances (EPS) as biological depressant Reagents*, Preprints of the XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town, 28.09.-03.10.2003
- [27] T. Mütze, K. Husemann, U.A. Peuker, The ideal particle bed, *Das Ideale Gutbett*, *Chem. Ing. Tech.* 83 (2011) 720-724.
- [28] K. Schönert, The influence of particle bed configurations and confinements on particle breakage, *International Journal of Mineral Processing* 44-45 (1996) 1-16.

DECHEMA
Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-0
Telefax: 069 7564-117
E-Mail: info@dechema.de