

Anorganische Rohstoffe – Sicherung der Rohstoffbasis von morgen

Positionspapier des Temporären
ProcessNet-Arbeitskreises
„Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“



IMPRESSUM

Herausgeber

Temporärer ProcessNet-Arbeitskreis „Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.

Dr. Andreas Förster

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Erschienen im November 2015

ISBN: 978-3-89746-177-2

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
1. Herausforderungen und Möglichkeiten der Rohstoffgewinnung	3
1.1. Primärrohstoffe	3
1.2. Sekundärrohstoffe	4
1.3. Substitution	8
1.4. Ressourcenschonung und -effizienz	9
2. Zusammenfassung	10
3. Sachstandsanalysen	14
3.1. Aluminium	14
3.2. Antimon	16
3.3. Beryllium	17
3.4. Borate	18
3.5. Chrom	20
3.6. Edelmetalle inkl. Metalle der Platingruppe	21
3.7. Eisen / Stahl	23
3.8. Flussspat	25
3.9. Gallium	27
3.10. Germanium	29
3.11. Graphit	30
3.12. Indium	31
3.13. Kalisalz	32
3.14. Kobalt	34
3.15. Koks Kohle	35
3.16. Kupfer	36
3.17. Lithium	38
3.18. Magnesit	40
3.19. Magnesium	41
3.20. Niob	43
3.21. Phosphate/Phosphatgestein	44
3.22. Seltenerdmetalle	46
3.23. Silicium	48
3.24. Wolfram	50
3.25. Zink	51
3.26. Zinn	53
4. Literaturverzeichnis	55
5. Autorenverzeichnis	61

Vorwort

Seit im Januar 2010 das von der DECHEMA gemeinsam mit GDCh, DGMK und VCI erarbeitete Positionspapier „Rohstoffbasis im Wandel“ erschienen ist, hat sich im gesamten Rohstoffsektor eine ungeahnte Dynamik entfaltet. Besonders durch das chinesische Exportlimit für Seltenerdmetalle gerieten diese nicht nur zum Synonym für die komplexe Rohstoffthematik, vielmehr zeigte sich im gesamten Bereich der anorganischen Rohstoffe, dass sich nicht nur die westlichen Industrienationen, sondern auch die Schwellenländer in einer Situation wiederfanden, die von einem komplizierten Wechselspiel zwischen finanzmarkt- und nachfragegetriebener Preisentwicklung gekennzeichnet war. Die bis in die Öffentlichkeit hineinreichende gesteigerte Aufmerksamkeit gegenüber der Rohstoffthematik führte zu einem Bewusstseinswandel hinsichtlich der Sicherung unserer Rohstoffbasis. Mithin entwickelte sich ein Konsens, dass sich hieraus unmittelbare Konsequenzen für die Sicherung unserer Lebensumstände ergeben. In der Folge wurden verschiedene Monographien verfasst und Studien angefertigt, von denen die im Mai 2014 veröffentlichte Liste der EU-Kommission zu den 20 wichtigsten kritischen Rohstoffen sicherlich eine der prominentesten ist.

Dieses Positionspapier nimmt eine aktualisierte Bestandsaufnahme und eine neutrale Bewertung der Situation in der Bundesrepublik Deutschland vor. Gleichzeitig zielt dieses Papier auch darauf ab, nicht nur die öffentlichkeitswirksamen, sogenannten kritischen Rohstoffen zu beleuchten, sondern zusätzlich solche Rohstoffe mit einzubeziehen, die seit jeher unseren Alltag bestimmen und welche auch rein mengenmäßig wichtige Rohstoffe darstellen. Es finden sich daher ebenfalls Betrachtungen zu den Elementen Eisen und Kupfer, aber auch der für unsere Ernährung unverzichtbare Düngemittelsektor ist Gegenstand der Darlegungen. Darüber hinaus bezieht das Papier z.B. auch Lithium mit ein, das eine wesentliche Grundlage für die Elektromobilität darstellt, sowie essentiell für die kabellosen Stromversorgungssysteme ist.

Dieses Positionspapier versucht Bewertungen für diejenigen anorganischen Rohstoffe vorzunehmen, die unseren Alltag jetzt und zukünftig bestimmen bzw. für die eine solche Rolle aktuell diskutiert wird. Dabei kann und will dieses Positionspapier nicht die gesamte Rohstoffthematik in ihrer Vielschichtigkeit beleuchten. Vielmehr zielt es darauf ab, dem Leser einen Kurzleitfaden an die Hand zu geben, der ihm ermöglicht, sich bezüglich der jeweiligen Rohstoffe und Themengebiete einen Überblick über die relevanten Faktoren zu verschaffen. Es zeigt sich hierbei, dass es an der Zeit ist, neben der weithin bekannten „Energiewende“ das Augenmerk auf eine ebenso notwendige „Rohstoffwende“ zu lenken.

Hierzu haben sich eine Reihe von Wissenschaftlern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie zusammengefunden, um Sachstandsanalysen vorzunehmen, die Situation für die genannten Rohstoffe kritisch zu beleuchten, anhand realer Zahlen und Daten zu bewerten und darüber hinaus Empfehlungen auszusprechen, für welche Herausforderungen zukünftig Anstrengungen im Bereich der Forschung und Entwicklung notwendig sind.

Ihnen allen sei an dieser Stelle der Dank des herausgebenden temporären Arbeitskreises „Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“ ausgesprochen.

Frankfurt, im November 2015

1. Herausforderungen und Möglichkeiten der Rohstoffgewinnung



1.1. Primärrohstoffe

Seit jeher nutzt der Mensch Primärrohstoffe. Waren es in der Frühzeit der Menschheit im Wesentlichen Biomasse und Gesteine, wurde das Spektrum der eingesetzten Rohstoffe immer komplexer. Der Mensch lernte Bronze (Kupfer und Zinn) zu nutzen, es kamen Eisen, Blei u.a. hinzu. Doch wie in keinem anderen Zeitraum der Menschheitsgeschichte haben in den vergangenen 100 Jahren der technologische Fortschritt sowie die rasant wachsende Erdbevölkerung nicht nur eine geradezu explosionsartige Zunahme der Primärrohstoffgewinnung zur Folge gehabt. Auch die Vielfalt der eingesetzten Rohstoffe ist so groß wie nie zu vor. Nahezu alle Elemente des Periodensystems unterliegen heute einer wirtschaftlichen Nutzung. Damit verbunden sind allerdings auch hochkomplexe Fragen der Rohstoffbereitstellung. Längst nicht alle Länder verfügen heute über die Mengen an Rohstoffen, die sie benötigen. Länder wie Deutschland gelten seit jeher als rohstoffarm.

Gerade für die Industrienationen ist eine sichere Versorgung mit Rohstoffen in ausreichender Quantität wie Diversität zu marktgerechten Konditionen maßgeblich für die Wettbewerbsfähigkeit auf den Weltmärkten. Ungeachtet aller Recyclinganstrengungen werden die großen Wirtschaftsräume bis auf weiteres auf Primärrohstoffe angewiesen sein.

Die Verlagerung der Produktion in den großen Industrienationen auf Hightech-Produkte führte zu einer Konkurrenz um begehrte Rohstoffe, die schnell auch das Interesse der Finanzmärkte auf sich zog. Spätestens seit der Ausfuhrbeschränkung Chinas für die Seltenen Erden ist man sich in den westlichen Ländern nicht nur seiner Abhängigkeitssituation bewusst, auch der Begriff der Kritikalität gewann an Bedeutung. Insbesondere für die sog. Hightech-Metalle, wie z.B. Seltenerdmetalle, ist die Kritikalität zum Sinnbild der Abhängigkeit von Lieferländern geworden. Geopolitische Motivationen nehmen einen wachsenden Raum ein, während zur gleichen Zeit kritische Rohstoffe in einem Ausmaß mit maximaler Verdünnung (Dissipation)

in Consumer-Produkten eingesetzt werden, die eine eventuell kritische Versorgungslage kaum vermuten lässt. Angesichts der Zunahme an Bedarfsgegenständen, insbesondere im Bereich von Gütern, die nicht zur unmittelbaren Sicherung der Lebensumstände beitragen, sehen sich die Hersteller mit wachsender Nachfrage konfrontiert. Diese Situation verstetigt damit die Abhängigkeit von Primärrohstofflieferanten. Denn zum einen reicht die Recyclingkapazität nicht aus, um den gesamten Rohstoffbedarf zu befriedigen. Zum anderen entzieht die Komplexität moderner Produkte viele kritische Metalle einem wirkungsvollen Recycling.

Die Industrie sieht sich somit mit zwei überlebenswichtigen Herausforderungen konfrontiert: Rohstoffverfügbarkeit und Rohstoffpreis. Knappe Rohstoffe wirken sich auf die Lieferfähigkeit eines Landes genauso aus wie überbeuerte. Die Versorgungslage kann somit schnell durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

- » Exportstaaten verändern die Lieferströme
- » Spekulationen treiben die Preise
- » Technische Veränderungen führen zu Marktengpässen
- » Rohstoffvorkommen erschöpfen oder die Gewinnung wird eingestellt

Vor allem bei Rohstoffen, die nur in geringen Mengen und durch eine geringe Anzahl an Produzenten gewonnen werden, können bereits geringe Änderungen starke Auswirkungen auf den Märkten provozieren.

Je länger und je komplexer die Versorgungskette für einen Rohstoff ist, desto anfälliger ist die Versorgungslage für Störungen. In der Wertschöpfungskette Bergbau → Rohstoffhändler → Verarbeiter (Hütte) → Hersteller können bereits Änderungen bei einem Glied zu massiven Marktverwerfungen führen. Dabei ist es nicht nur die Konzentration auf wenige Förderländer allein, welche die Kritikalität eines Rohstoffes ausmacht. Wenn in einem Land Herstellkapazitäten fehlen, obwohl der Rohstoff im selben Land vielleicht sogar in ausreichender Quantität und Qualität verfügbar ist, kann dies bereits ein Kritikalitätskriterium sein.

Industrieländer sind auch im Hinblick auf die Länderkonzentration der Reserven und der Produktion auf eine sichere Erzeugung von Primärrohstoffen angewiesen. Fehlen aber Verarbeitungs- bzw. Verhüttungskapazitäten im eigenen

Land, kann dies zu wirtschaftlichen Verwerfungen führen, die weder den Förderländern noch der Recyclingwirtschaft angelastet werden können. Ein vorausschauendes politisches Handeln hat daher stets eine ausreichende Diversifizierung der Wirtschaftssektoren im Blick. Es ist in diesem Zusammenhang ein absoluter Trugschluss zu glauben, dass eine Schwerindustrie für eine hochentwickelte Industrie unnötig sei. Vielmehr ergibt sich aus ihrem Fehlen eine zunehmende Abhängigkeit von externen Lieferländern, und gleichzeitig wird eine Volkswirtschaft mitunter ihrer Fähigkeit beraubt, Sekundärrohstoffe in ausreichender Menge und Qualität recyceln zu können. Das nicht unrealistische Szenario eines energiewendeeinduzierten Abwanderns der Aluminiumverhüttung aus Deutschland hätte ungeahnte Folgen für den heimischen Wirtschaftsstandort. Kontraproduktiv wirken sich auch aktuelle Trends aus, gefährliche Produktionsprozesse in Drittländer auszulagern und somit auf lange Sicht inländische Produktionskapazitäten abzubauen. Das Gleiche gilt für die zunehmende Ablehnung bergbaulicher Tätigkeiten. Die Sicherung der Rohstoffbasis einer modernen und auch in Zukunft wettbewerbsfähigen Industrienation ist auch weiterhin mit dem Umgang potentiell schädlicher Substanzen verbunden. Das schließt Recyclingverfahren ein. Die Fähigkeit einer Industrienation, sich aus den ihr zur Verfügung stehenden Rohstoffquellen mit den benötigten Rohstoffen zu versorgen, trägt maßgeblich zur Sicherung des Rohstoffbedarfs bei.



1.2. Sekundärrohstoffe

Grundvoraussetzungen für ein effizientes Recycling

Eine sichere Versorgung mit kritischen Rohstoffen – speziell für Hightech-Anwendungen – wird zunehmend als wichtiger Wirtschaftsfaktor für die europäische Industrie gesehen. Gerade für viele Technologiemetalle gibt es nicht genug nutzbare Primärlagerstätten in Europa. Jedoch führt die ständige Weiterentwicklung der Informationstechnologien, des Automobil- und Anlagenbaus sowie der Energietechnik am Lebensende von Geräten und Infrastruktur zur Bildung einer anthropogenen Lagerstätte sowie Abfallströmen, die in Bezug auf ihre Qualität und Zusammensetzung teilweise eine hohe Volatilität aufweisen. Um sowohl diese Abfallströme als auch die Lagerstätte vor

Zielkonflikt: Recyclingorientiertes Design vs. Rohstoffeffizienz

Beispiel: Kondensatoren

Am Beispiel der Kondensator-Entwicklung für mobile Anwendungen zeigt sich ein Zielkonflikt:

Ziel 1: „Recyclingfreundliches Design“: Dies erfordert erkennbare, demontierbare, sortierbare Elektronikbauteile mit gewisser Mindestgröße;

Ziel 2: „Rohstoffeffizienz“: die Steigerung der spezifischen Leistung bzw. Verringerung des Material-Einsatzes pro Leistungseinheit führte zur Entwicklung der Tantal-Pastentechnologie, bei der ultraflache Kondensatoren auf die Platine „gedruckt“ werden. Eine Marktakzeptanz ist wegen der flacheren Geräteformen eher für Ziel 2 zu erwarten.

Beispiel: Katalysatoren

Technische Optimierungen und Weiterentwicklungen stellen das Recycling oftmals vor neue Herausforderungen. Am Beispiel von molybdänhaltigen Selektivoxidationskatalysatoren für die Propylenoxidation wird deutlich, dass Produktinnovation und Forschung in Richtung höherer Aktivität und Selektivität zu einer komplexeren Katalysatorzusammensetzung führen. Vor einigen Jahrzehnten als simples Wismutmolybdat entwickelt, enthalten die Katalysatoren heute ein komplexes System aus Promotoren und Additiven, was ein komplettes Recycling aller enthaltenen Metalle entsprechend dem Stand der Technik gegenüber dem ursprünglichen Katalysator deutlich erschwert.

unserer Haustüre („urban mine“) nutzbar zu machen, bedarf es angepasster und intelligenter Recyclingketten. Die folgenden acht Grundvoraussetzungen, die aufeinander aufbauen, müssen für ein effizientes Recycling erfüllt sein:

1. Ausreichende potenzielle Verfügbarkeit (kritische Masse für wirtschaftliche Mindestanlagenauslastung)
2. Technische Rezyklierbarkeit des Materials
3. Zugänglichkeit des relevanten Bauteils (design for recycling)
4. Wirtschaftlichkeit der Prozesskette (durch intrinsischen Materialwert oder externe Anreize)
5. Sammelerfolg
6. Verbleib in der Recyclingkette (Verhinderung illegaler Exporte)
7. Nutzung hochwertiger Recyclingkapazitäten (Zertifizierung, Audits etc.)
8. Technisch-organisatorische Auslegung der Recyclingkette (Systemischer Ansatz)

Dabei sind sowohl die Produktperspektive (welche spezifischen Anforderungen ergeben sich für das Recycling der verschiedenen in einem Produkt enthaltenen Materialien unter Beachtung von Interdependenzen) als auch die Materialperspektive (was ist zu tun, um ein bestimmtes Material zurückzugewinnen) zu berücksichtigen.

Für die Umsetzung eines zukunftssträchtigen Recycling-Modells sind darüber hinaus die folgenden weiteren Schritte wichtig:

- » Gleiche regulative Rahmenbedingungen innerhalb der EU für alle Akteure
- » Ein früher Austausch zwischen der produzierenden Industrie und den Entwicklern neuer Werkstoffe mit der Recyclingindustrie, um Recyclingfragen schon bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen und der Recyclingindustrie ausreichenden Vorlauf für die Verfahrensentwicklung bei neuen Werkstoffen zu geben.
- » Die Schaffung eines Instrumentes, mit dem sich die quantitativen und qualitativen Veränderungen von Abfallströmen besser prognostizieren lassen.

Das Metallrecycling weist eine der höchsten Rückführungsraten auf, wenn auch nicht für alle Metalle gleichermaßen. Grundsätzlich kann eine Rückführung in den Kreislauf beliebig oft erfolgen, ohne dass Qualitätseinbußen auftreten. Da aber viele Metalle, wie z.B. Stähle oder Aluminium, als Legierungen in den Recyclingprozess gelangen, ergeben sich besondere Herausforderungen an die Wiedergewinnungstechnologie, um ein Downcycling zu vermeiden und stattdessen effektives Recycling im Sinne einer Bereitstellung von Primärproduktqualität sicherzustellen.

Die Recyclingrate der einzelnen Metalle hängt von der Verwendung (Produktperspektive) ab; hier spielen Aspekte wie Menge pro Bauteil, Einsatz in industriellen oder Endverbraucherprodukten, Elementvielfalt und Lebensdauer der Produkte eine entscheidende Rolle. Bei dissipativen Anwendungen (z.B. Farbpigmente, Metalle in Textilfasern) macht Recycling i.d.R. schon im Hinblick auf die Energiebilanz keinen Sinn, da die Konzentration im Abfall viel geringer ist als in natürlichen Lagerstätten. Auch bei komplexen Produkten, wie z.B. Mobiltelefonen, kann das Recycling einzelner Elemente (z.B. Tantal) grundsätzlich ein Problem sein, da neben einer geringen Konzentration

auch wirtschaftliche und/oder thermodynamische Wechselwirkungen mit dem Recycling anderer Metalle aus diesem Produkt auftreten können.

Die Rolle des Abfallrechts im Rohstoffrecycling

Mit der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wurde die vormalige 3-stufige Zielhierarchie des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (1. Vermeiden, 2. Verwerten, 3. Beseitigen) in eine 5-stufige Zielhierarchie überführt. Diese differenziert nun, dass Abfälle 1. zu vermeiden und 2. zur Wiederverwendung vorzubereiten sind. Auf den nächsten Ebenen sollen Abfälle dann 3. einem Recycling zugeführt, 4. anderweitig verwertet und 5. beseitigt werden.

Die europaweit harmonisierte Zielhierarchie ist bezüglich des Recyclings in zweifacher Hinsicht bedeutsam. Erstens wird der Begriff Recycling nunmehr an prominenter Stelle direkt genannt, zweitens wird dem Recycling ein Vorrang vor anderweitigen Verwertungsoptionen (z.B. energetischer Nutzung) eingeräumt. Dieser Umstand trägt der zunehmenden Wahrnehmung von Abfällen als sekundäre Ressource Rechnung, die in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden soll, um primäre Ressourcen zu schonen.

Behördliche Positionen vs. konsequentes Urban Mining

Für ein neu entwickeltes Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche wurde in einem aufwändigen, durch die betreffende Landesfachbehörde begleiteten Verfahren der Nachweis erbracht, dass der entsprechende Prozess alle Kriterien erfüllt, die das Ende der Abfalleigenschaft markieren. Das Produkt – ein dem konventionellem Triple Superphosphat ebenbürtiger P-Dünger aus Klärschlammasche – wurde aus dem Rechtsrahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes entlassen und als Düngemittel zugelassen.

Als Markteintrittsbarriere wirkte sich jedoch aus, dass die hinsichtlich Qualität und Quantität bedeutsame Klärschlammasche einer speziellen Monoverbrennungsanlage kurzfristig durch die Behörden zu gefährlichem Abfall umklassifiziert wurde. Hierdurch war die Asche nicht mehr als Inputstrom für das Verfahren zugelassen, da die Produktionsanlage ausschließlich für nicht gefährliche Abfälle genehmigt war. Hinzu kam im konkreten Fall die Tatsache, dass Düngemittel in unmittelbarem Zusammenhang mit der Nahrungskette stehen. Wird zur Erzeugung des Düngemittels ein nicht gefährlicher Abfall genutzt, besitzt dies ohne Abstriche die positive Konno-

tation des Recyclings. Ist jedoch das stofflich identische Material ein gefährlicher Abfall, entsteht der Eindruck, die Nahrungskette werde durch toxische Stoffe belastet.

Die Begründung für die Deklaration als gefährlicher Abfall war der Eluatwert der Asche für Molybdän, der in Vergleich zu den Zuordnungswerten der Deponieverordnung gesetzt wurde. Diese Sichtweise ist abfallrechtlich eng ausgelegt, da die Toleranzgrenzen der Deponieverordnung nicht ausgeschöpft wurden. Darüber hinaus wurde die Produktperspektive nicht berücksichtigt, da Molybdän aus Sicht der Pflanzenernährung ein wichtiger Nährstoff ist, der für bestimmte Böden den Düngemitteln speziell zugesetzt wird.

Das Beispiel zeigt das Erfordernis klarer und verlässlicher (rechtlicher) Rahmenbedingungen. Bedeutend ist darüber hinaus eine harmonisierte Sichtweise der Fachbehörden bei dem für ein konsequentes Recycling teils unumgänglichen Wechsel des Rechtsrahmens hin zum Produktrecht sowie die Einbeziehung der Produktperspektive.

Recycling im rechtlichen Sinne ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen (Materialien oder Stoffen) aufbereitet werden, die entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke eingesetzt werden. Vielfach findet innerhalb des Recyclingprozesses ein Wechsel des Rechtsrahmens statt, da der Inputstrom dem Abfall-, der Output hingegen dem Produktrecht unterliegt. Ersteres bedingt, dass Recyclinganlagen abfalltechnische Anlagen sind, deren Genehmigungsinhaber (=typischerweise der Entsorger) berechtigt sein müssen, die betreffenden Abfälle anzunehmen.

Als Entsorger können Anbieter von Recycling-Verfahren möglicherweise in zweifacher Hinsicht an der Wertschöpfungskette beteiligt sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn sie als Anbieter neuer Verfahren darauf angewiesen sind, nicht nur Produkterlöse zu erzielen, sondern wenn sie zur Kostendeckung auch an den – gegenüber etablierten Entsorgungswegen – geminderten Entsorgungsgebühren partizipieren müssen, um das neue Verfahren am Markt zu etablieren. Triebfeder für diese Mischkalkulation ist die Primärverantwortung des Abfallerzeugers für die schadlose Entsorgung. Diese orientiert sich typischerweise an den etablierten Entsorgungswegen und deren Kostenstruktur.

Je nach Ausgestaltung der Mischkalkulation kann diese bei den Fachbehörden zu einer reservierten Grundhaltung gegenüber neuartigen Recyclingtechnologien führen. Auslöser mag nicht zuletzt die dortige Vermutung sein, der monetär ausschlaggebende Faktor liege in den geminderten Entsorgungskosten und nicht im Produkterlös (vgl. Definition „Ende der Abfalleigenschaft“ nach § 5 KrWG). Interessanterweise liegt hierin gleichermaßen die Chance wie auch die Bremse für innovative Recyclingtechnologien.

Das Abfallrecht sieht vor, dass der Output eines Recyclingprozesses nur dann aus dem Rechtsrahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes entlassen werden kann, wenn das Ende der Abfalleigenschaft nachweislich erreicht ist. Dies erfordert eine zweckgebundene Verwendung des Outputs, die Existenz eines Marktes oder einer Nachfrage für das Produkt, die Erfüllung aller rechtlichen und technischen Normen, die für den Verwendungsbereich gelten und die Schadlosigkeit der Verwendung des Outputs. Diese Forderungen sind spiegelbildlich zu den Kriterien, die ein Produkt zum Abfall machen, wobei hierfür zusätzlich noch der Entledigungswille (gemäß KrWG § 3, Ziffer 1) gegeben sein muss.

Beleuchtet man die Forderung nach der Existenz eines Marktes kritisch, so ist festzustellen, dass es natürlich auch für Abfälle bereits einen Markt gibt. Dieser speist sich aus den Entgelten, die der Abfallerzeuger dafür entrichtet, dass er seine originäre Verpflichtung zur schadlosen Entsorgung (=Verwertung oder Beseitigung) an Dritte weiterreicht. Anbieter neuer Recycling-Technologien stehen somit vor einer doppelten Herausforderung: Sie müssen einerseits die Validität des Verfahrens gegenüber den Fachbehörden demonstrieren und andererseits gegen etablierte Akteure antreten. Rückendeckung aus der Politik ist leider nicht immer gleichbedeutend mit Erfolg.

Die Stärkung des Recyclingaspekts im Kreislaufwirtschaftsgesetz trägt sicherlich dazu bei, die Ressource Abfall künftig besser zu nutzen. Jedoch geht mit dem Wechsel des Rechtsrahmens (Abfallrecht → Produktrecht) nahezu zwangsläufig ein Wechsel der behördlichen Zuständigkeit einher.

Für manche Bereiche des Metallrecyclings (z.B. Superlegierungen und Zwischenstufen daraus) müssen gleichzeitig die Vorgaben von Zoll-, Abfall-, und Chemikalienrecht erfüllt werden, was gerade im außereuropäischen, grenzüberschreitenden Handel eine zusätzliche Herausforderung und Hürde für das Recycling darstellt.

Handlungsbedarf besteht deshalb hinsichtlich einer harmonisierten Sichtweise der jeweiligen Akteure, um die Ressourcenschonung als gesamtgesellschaftliche Aufgabe konsequent voranzubringen.

Vision der zukünftigen Kreislaufwirtschaft

Wichtig ist ein Umdenken, bei dem neben den technischen Prozessen auch Konsumentenverhalten, Logistik und Sammelsysteme (z.B. Autozerlegung und EU-Vorgaben zur Recyclingrate vs. Exporte von Gebrauchtwagen ins Ausland) berücksichtigt werden. So können durch das Schließen von Stoffkreisläufen für die europäische Industrie eine Sicherung der Rohstoffbasis, Innovationen bei Trenntechnologien und schließlich Wirtschaftswachstum erreicht und Arbeitsplätze geschaffen werden.

Recycling verringert zudem die Abhängigkeit von volatilen Marktpreisen für kritische Elemente und es ergeben sich in den meisten Fällen Möglichkeiten für eine signifikante CO₂-Einsparung.

Internationaler Rohstoffhandel mit Recyclingstoffen

Interesse an Recycling von Technometallen besteht weltweit – auch in China. Entsprechend müssen Europas Grenzen dafür offen sein, dass metallhaltige Stoffe (als „gefährlicher“ Abfall oder als Produkt, sofern vorbehandelt) mit vertretbarem Aufwand importiert werden können. Notifizierungsverfahren mit über einem Jahr Dauer erschweren den Weg nach Europa ebenso wie hohe Zusatzkosten für REACH-Dossiers oder die REACH-Auflage für betriebliche Versuche, die dabei entstandenen Produkte (Metalle!) keinesfalls in den Markt zu bringen. Dadurch wird der Import von z.B. gebrauchten Katalysatoren oder Teilströmen aus dem Recycling von Superlegierungen derzeit erheblich erschwert bzw. teilweise unmöglich gemacht.

Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung

Recycling kann und darf nicht in Konkurrenz zur primären Rohstoffgewinnung gesehen werden, sondern ist für die Rohstoffversorgung von komplementärer Bedeutung. Durch einen klugen und nachhaltigen Umgang mit den Rohstoffen in Deponien und Halden und denen, die gegenwärtig über Sammelsysteme erfasst werden, lässt sich aber eine sinnvolle Balance zwischen Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung etablieren. Darüber hinaus ist es wichtig, durch Materialinnovation (Substitution und effizienten Materialeinsatz) bei gleicher oder verbesserter Funktionalität die Ressourcennachfrage zu optimieren. Ob und welcher Rohstoff für Produktionszwecke herangezogen wird, hängt ganz maßgeblich von seiner Verfügbarkeit und Qualität ab.

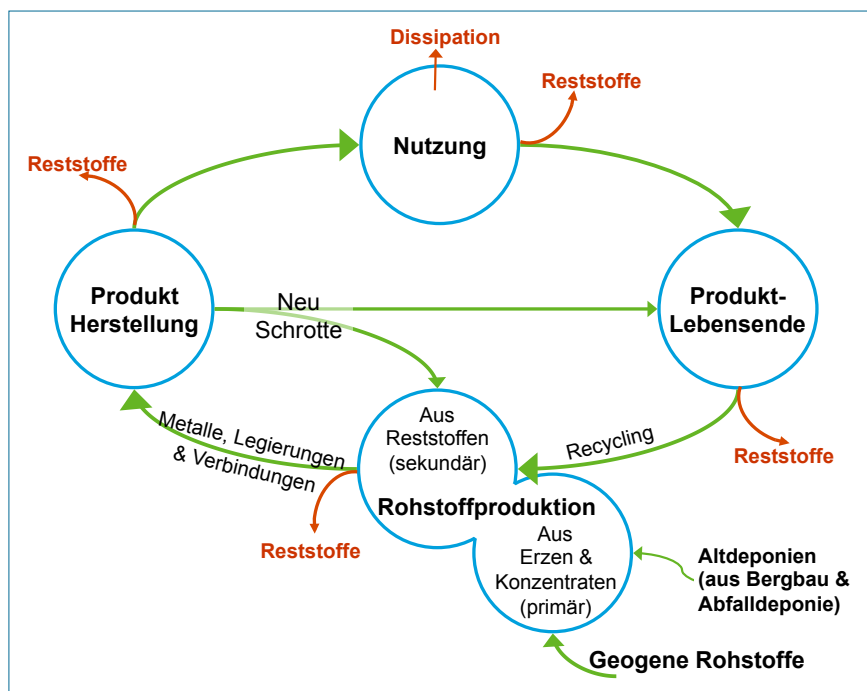
Vision der Kreislaufwirtschaft entlang des Produkt- und Materiallebenszyklus. Bei den aufgeführten Reststoffen handelt es sich entweder um Abfallstoffe oder Nebenprodukte im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. (Quelle: Umicore AG & Co.KG)

1.3. Substitution

Für die Substitution von Rohstoffen gibt es derzeit eine Vielzahl an Konzepten und Strategien, bei welchen z.B.:

- » ein Rohstoff durch einen anderen ersetzt wird,
- » ein konventionelles Materialsystem durch ein anderes optimiertes Materialsystem ersetzt wird, welches aber auf derselben Funktion beruht,
- » ein konventionelles Materialsystem durch ein anderes optimiertes Materialsystem ersetzt wird, welches denselben Zweck mittels einer anderen Funktionalität erfüllt oder
- » ein Rohstoff durch eine ganz neue Anwendung vollständig ersetzt wird (Bsp. Ersatz von Kupfer- bzw. Glasfaserkabeln durch WLAN).

Im Hinblick auf kritische Metalle ist besonders der vollständige aber auch teilweise Ersatz durch besser zugängliche Metalle erstrebenswert – allerdings unter der Maßgabe, dass die Recyclingeigenschaften des Produktes dadurch nicht beeinträchtigt werden. Darüber hinaus ist Substitution dort sinnvoll, wo das Recycling derzeit nicht funktioniert (z.B. bei dissipativen Anwendungen kritischer Metalle) und um einen effizienteren Einsatz von Rohstoffen zu ermöglichen.



Eine Herausforderung stellen die i.d.R. langen Vorlauf- und Entwicklungszeiten dar. Für Hightech-Anwendungen auf Basis spezieller Werkstoffeigenschaften ist die Umsetzung insofern schwierig, dass die Substitute oft andere Eigenschaften als die ursprünglichen Ausgangsstoffe aufweisen. Substitution hat immer weitere Folgen (z.B. sind oftmals andere Verfahren und somit kostenträchtige Prozessumstellungen notwendig), die berücksichtigt werden müssen.

Dennoch werden von tragfähigen Substitutionskonzepten durchaus Wirkungen auf die Rohstoffmärkte bzw. die Versorgungslage erwartet. Gleichwohl zeigt die aktuelle Entwicklung (Herbst 2015), dass die Volatilität der Rohstoffmärkte so hoch ist, dass bei Preisverfall schnell Preisregionen erreicht werden, in denen Substitute wirtschaftlich nicht mehr konkurrenzfähig sind.

Die Bemühungen zur Substitution kritischer Rohstoffe werden im Grundsatz begrüßt, dieses durchaus dynamische Handlungsfeld soll jedoch in diesem Positionspapier keiner eingehenderen Betrachtung unterzogen werden.

1.4. Ressourcenschonung und -effizienz

Jedweder Umgang mit Rohstoffen wirkt sich unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens aus. Der schonende Umgang mit Ressourcen kann daher durchaus als Selbstzweck wirtschaftlichen Handelns gesehen werden. In einer Diskussion um Ressourcenschonung bzw. Ressourceneffizienz ist auf der einen Seite grundlegend zwischen Rohstoffeinsatz und Energieverbrauch zu differenzieren. Auf der anderen Seite ist die Frage nach dem Einfluss des industriellen Handelns auf die Umwelt zu stellen. Alle Punkte sind eng miteinander verwoben. Dennoch darf eine Betrachtung der Ressourceneffizienz nicht übersehen, dass es zur Herstellung von Produktionsgütern rein physikalisch einer bestimmten Mindestmenge an Rohstoffen bedarf. Die Erfolge ressourcenschonender Produktion werden daher häufig einer energieeffizienten Produktion gleichgesetzt. In der Diskussion um den anthropogene Klimawandel kamen noch der carbon footprint sowie in jüngster Zeit der water footprint hinzu.

Demzufolge wird eine nachhaltige Nutzung von Rohstoffen zunehmend nicht nach der Menge der eingesetzten Ressourcen beurteilt, sondern anhand der Folgen für die Umwelt. Hier hat die deutsche Chemieindustrie bereits eine Vorreiterrolle inne. Davon zeugt allein das Verbund-

konzept, nach dem Chemiestandorte aufgebaut sind. In keinem anderen Wirtschaftszweig wird eine so vollständige Stoff- und Wärmeintegration geleistet wie in der Chemieindustrie.

Dies sei an verschiedenen Zahlen verdeutlicht: 1995 fielen pro Tonne Rohstoffe noch 115 kg Abfall/t eingesetztem Rohstoff an. Im Jahr 2007 waren es nur noch ca. 20 kg. Im Vergleichszeitraum stieg jedoch die Menge an eingesetzten Rohstoffen um etwa 25%. Gleichzeitig wurde die Belastung der Gewässer auf ca. 20% des Wertes von 1995 reduziert.

Auch die Zahlen zur Energieeffizienz zeigen die Fortschritte, die hierzulande in der Chemieindustrie bereits erreicht wurden. Deutschland steht derzeit in puncto Energieeffizienz mit 2.000 KWh pro 1.000 USD BIP weltweit an zweiter Stelle hinter Japan und hat somit ein sehr hohes Niveau erreicht. Dies ist insbesondere in Anbetracht der Tatsache beachtlich, dass die Produktion der deutschen Chemiewirtschaft im Zeitraum 1990 – 2010 um 50% gewachsen ist.

Um auch zukünftig das Wirtschaftswachstum vom steigenden Ressourcenverbrauch und zunehmenden CO₂-Ausstoß zu entkoppeln und somit globale Herausforderungen zu meistern sowie den Wohlstand auch für kommende Generationen zu sichern, sind weitere Anstrengungen notwendig.

Auf Forschungsseite werden Aspekte dieser Herausforderungen u.a. im BMBF-Rahmenprogramm „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“ adressiert und aufgegriffen.

Die Entwicklungen der Chemie- und Rohstoffindustrie sowie der Forschung zu einer sich stetig verbessernden Ressourceneffizienz werden begrüßt. Eine weitergehende Diskussion zu dieser Thematik soll jedoch in diesem Positionspapier nicht vorgenommen werden.

2. Zusammenfassung



Das vorliegende Positionspapier beschreibt für eine ausgewählte Anzahl von wirtschaftlich bedeutsamen bzw. durch die EU im Mai 2014 als kritisch eingestuft Rohstoffen die Versorgungslage für die Bundesrepublik Deutschland. Anhand der Punkte wirtschaftliche Bedeutung, Vorkommen, Gewinnungstechnologien und Recycling wurde für jeden der hier betrachteten Rohstoffe der Status quo ermittelt. Unter Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurden all die Punkte zusammengefasst, die nach Auffassung der Autoren für eine Stärkung des Wirtschaftsstandortes Deutschland bzw. die Sicherung der Rohstoffbasis zielführend sind.

Generell zeichnet sich ab, dass nach wie vor der weit überwiegende Anteil der Rohstoffe aus der Primärproduktion stammt, während sich die Einbeziehung von Sekundärrohstoffen nur in begrenztem Maße durchgesetzt hat. In der überwiegenden Zahl dominieren wirtschaftliche Kriterien die Einbindung von Sekundärrohstoffen in die Produktionsprozesse. Vor allem bei seltenen Rohstoffen, wie z.B. den Platingruppenmetallen, wirkt sich neben den ohnehin schon hohen Preisen auch die eingeschränkte

Rohstoffverfügbarkeit förderlich auf die Recyclingbemühungen aus. Ob und in welchem Maße Sekundärrohstoffe eingesetzt werden können, entscheidet darüber hinaus auch die Frage nach der Qualität einzelner Rohstoffe aus Recyclingprozessen. So ist derzeit ein echtes Recycling zu Produkten in Primärrohstoffqualität auf wenige Rohstoffe beschränkt. Typischerweise sind dies Platingruppenmetalle und Kupfer. Selbst bei Eisen und Stahl sowie Aluminium, die eine bedeutende Kreislaufquote aufweisen (70 bzw. 58%), stellt die Auftrennung der enthaltenen Legierungsbestandteile ein mitunter schwer überwindbares Hindernis dar.

Die BMBF-Fördermaßnahmen zu „Innovativen Technologien für Ressourceneffizienz“ sind in diesem Zusammenhang ein wichtiger Schritt. Ihr Ziel ist es, das Recycling sowie die Substitution von bedeutenden Rohstoffen weiter voranzutreiben und Potentiale für einen effizienteren Umgang mit Ressourcen zu identifizieren und zu erschließen.

In der Beurteilung der Kritikalität einzelner Rohstoffe ist die Länderkonzentration ein wichtiger Faktor, d.h. wie dif-

ferenziert der Markt für Lieferländer ist bzw. wie stark der Markt auf eines oder wenige Lieferländer konzentriert ist. Beispielhaft lassen sich hier die Versorgung mit Bor nennen, die auf die Hauptproduzenten Türkei und USA konzentriert ist oder die Versorgungslage für Seltenerdmetalle, deren Produktion sich nahezu ausschließlich auf China beschränkt. Als weitere Gründe für eine Einstufung als „kritischer Rohstoff“ werden aber auch solche aufgeführt, die weniger mit der Rohstoffverfügbarkeit an sich assoziiert sind, sondern sich vielmehr an Produktions- und Verarbeitungskapazitäten im betrachteten Abnehmerland orientieren. Als Beispiel sei Magnesium genannt. Da gerade Deutschland über bedeutende Magnesiumvorräte in den heimischen Salzlagerstätten verfügt, erscheint die schwierige Versorgungslage für dieses Leichtmetall gerade vor dem Hintergrund paradox, dass bis zum 2. Weltkrieg ca. 70% der Weltjahresproduktion aus Deutschland stammten, man aber hierzulande seit den 1950er Jahren ausschließlich auf Importe angewiesen ist, da die Produktion im Inland aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt wurde.

Ein zusätzlicher Faktor sind politische Erwägungen. Phosphor ist ein Beispiel für einen Rohstoff, dessen statische Reichweite bei 1.000 Jahren liegt, weswegen er bei alleiniger Betrachtung dieses Kriteriums kaum als kritisch einzustufen ist. Hier sorgten die Diskussion um einen „Peak Phosphorous“ für Verunsicherungen auf den Märkten sowie z.B. die Bekanntgabe weiterer Phosphatvorkommen in Marokko, durch welche im Jahr 2011 die bekannten Reserven von 5,7 Mio. t auf 50 Mrd. t anstiegen. Phosphor ist ein nicht substituierbares, für alle Organismen lebensnotwendiges Element, weswegen von Preissteigerungen bei Phosphat Konsequenzen für die Preise von Grundnahrungsmitteln befürchtet werden. Für die heimische Versorgungslage als kritisch erweisen sich jedoch die zunehmend hohen Schwermetallgehalte in verschiedenen Rohphosphatqualitäten, die einen erheblichen, kostenintensiven verfahrenstechnischen Mehraufwand zur Reinigung der Phosphorsäure bedingen. Das Versorgungsrisiko für Phosphor wird gegenwärtig als ‚mittel‘ eingestuft. Diese Faktoren zusammengenommen waren Grundlage für die Politik, Vorsorge zur Sicherung der Versorgung der heimischen Volkswirtschaft mit qualitativ hochwertigem Phosphat zu tragen. Die Bedeutung des Themas wurde in Deutschland bereits sehr frühzeitig erkannt, und so wurden insbesondere durch das BMBF seit Anfang der 2000er Jahre erhebliche Fördermittel in das Phosphor-Recycling aus Klärschlamm investiert.

Auch wenn Deutschland bei der Kreislaufwirtschaft führend ist, wird in den einzelnen Kapiteln dieses Position-

papiers deutlich, dass wir in vielen Bereichen noch weit von einer echten Kreislaufführung (closed-loop recycling) entfernt sind. Dies liegt zum einen daran, dass Produkte aus der Primärproduktion oftmals zu wesentlich wirtschaftlicheren Konditionen erhältlich sind. Hinzu kommt die bereits erwähnte, gewichtige Forderung, dass auch Sekundärrohstoffe Primärproduktqualität aufweisen müssen, um die Funktion des Rohstoffs im späteren Produkt sicherzustellen. Oftmals fehlt es auch schlichtweg an geeigneten Separationstechnologien, obwohl gerade Sekundärrohstoffe teilweise den Vorteil eines deutlich eingeschränkten Trennproblems bieten. Beispielhaft sollen die Permanentmagnete genannt sein: Hier genügt es u.U., aus den Neodym-Eisen-Bor-Magneten neben Eisen ein Gemisch aus wenigen Seltenerdmetallen zu isolieren. Die Magnete enthalten neben Neodym in der Regel nur die Seltenerdmetalle Praseodym, Dysprosium und/oder Terbium, die allerdings die magnetischen Eigenschaften und den Wert des Materials massiv beeinflussen. Im Gegensatz zu der Gewinnung aus Primärrohstoffquellen, bei der auch in Abhängigkeit von der lagerstättenindividuellen Anreicherung bestimmter Seltenerdmetalle oft eine deutlich größere Anzahl an enthaltenen Seltenerdmetallen voneinander getrennt werden muss, liegt somit durch die Neodym-Eisen-Bor-Altmanete ein ideales Ausgangsmaterial für ein energetisch und wirtschaftlich sinnvolles Seltenerdrecycling vor. Der Boranteil ist mit $\leq 1\%$ so gering, dass dessen Recycling wirtschaftlich zu hinterfragen ist.

Technologisch waren in den letzten Jahren gerade in den chemischen und verfahrenstechnischen Disziplinen deutliche Fortschritte zu verzeichnen. Neben den klassischen pyro- und hydrometallurgischen Ansätzen wurde neuerdings versucht, ganzheitliche Zugänge zu entwickeln und die komplexe Zusammensetzung polymetallischer Gemische in wässrigen Aufschlussmedien gezielt zu nutzen, um die Gesamtheit der enthaltenen Wertstoffe möglichst vollständig zu erfassen. Da nach der Abreicherung einer Hauptkomponente in vielen Fällen noch ausreichend Wertstoff in den Aufschlussmedien vorhanden ist, kann eine zielführende Kombination verschiedener Ansätze oftmals eine lohnende Herangehensweise sein. Zur Rückgewinnung der Metalle bieten sich hier auch elektrochemische Verfahren an. Auf diese Weise lassen sich durch geschicktes Verschalten der unterschiedlichen Trennmethoden neue Synergien erschließen. In Einheit mit mechanischen- und thermisch-verfahrenstechnischen sowie biologischen Ansätzen verschmelzen die Grenzen zwischen den verschiedenen Disziplinen heute vielfach.

Die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen stellt gerade die verfahrenstechnischen Disziplinen bis hin zu den Aufbereitungstechnologien vor neue Herausforderungen. Hinzu kommt eine Vielzahl bislang ungelöster rechtlicher Aspekte.

Die Versorgungslage der Industrienationen mit bestimmten Rohstoffen determiniert die Wettbewerbsfähigkeit eines Landes auf den Weltmärkten. Seitens der Autoren werden auf Basis der beschriebenen Sachlage folgende Empfehlungen ausgesprochen:

Handlungsempfehlungen:

1. Um auch in Zeiten einer Verknappung die Versorgung mit den jeweiligen Rohstoffen sicherstellen zu können, bedarf es unabhängig von Preisschwankungen im Rohstoffsektor einer **langfristigen nationalen Rohstoffstrategie** und entsprechender Handlungsstränge.
2. Sämtliche Aktivitäten zur Gewinnung, Aufbereitung und Handhabung sowie dem Recycling von Rohstoffen sollen rechtlich so flankiert werden, dass unter Wahrung der umweltpolitischen Ziele eine **Stärkung des Wirtschaftsstandortes** gewährleistet ist.
3. Um einen fairen Wettbewerb zu gewährleisten, sind auch innerhalb der **EU** gleiche **regulative Rahmenbedingungen** für alle Akteure notwendig.
4. Ebenso werden rechtliche und technologische Rahmenbedingungen benötigt, um die in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen **anthropogenen Lagerstätten zu nutzen**. Dafür müssen zunächst jedoch potentiell geeignete Halden/Deponien gesichtet, erfasst und charakterisiert werden.
5. Von einem Recycling um des Recyclings willen ist abzusehen. Vielmehr müssen Methoden entwickelt werden, mit denen sich die **Wertschöpfungspotentiale potentiell geeigneter abfallbürtiger Stoffströme und anthropogener Lagerstätten ermitteln und darstellen** lassen sowie die quantitativen und qualitativen Veränderungen von Abfallströmen über die Zeit prognostiziert werden können. Auch hier sind entsprechende umweltrechtliche Rahmenbedingungen notwendig und es muss der finanzielle Rahmen für Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet geschaffen werden.
6. Um die Ressourcenschonung sowie die Sekundärrohstoffverwertung in Form von handelsfähigen Produkten als gesamtgesellschaftliche Aufgabe konsequent voranzubringen, sollte z.B. bei einem Wechsel des Rechtsrahmens vom Abfall- zum Produktrecht **eine harmonisierte Sichtweise** der jeweiligen Akteure auf behördlicher Seite erreicht werden.



Recycling von Mobiltelefonen (Foto: Umicore AG & Co.KG)

7. Die intensive Förderung der **Entwicklung und Optimierung von Trennverfahren** zur Nutzung von Sekundärrohstoffen ist von großer Bedeutung für die Erschließung weiterer Recyclingpotentiale. Markteintrittsbarrieren (z.B. durch REACH) für neue Recyclingtechnologien müssen abgebaut werden.
8. Es ist sicherzustellen, dass einmal in die Volkswirtschaft eingebrachte Rohstoffe durch die **Bereitstellung entsprechender Sammellogistik und Aufbereitungskapazitäten** im Land erfasst und aufgearbeitet werden können. Dies sollte stets gegenüber einem Export in Dritt- oder die Herstellländer vorgezogen werden.
9. Die Entwicklung von Technologien und Prozessketten zur **sparsameren Verwendung von Ressourcen** sowie zur Einarbeitung von Kreislaufprodukten ist zu fördern, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie auf den Weltmärkten zu sichern und die Abhängigkeit der Volkswirtschaft von Rohstoffimporten zu reduzieren.
10. Die **Forschung zur Substitution** kritischer Elemente sollte zentraler Bestandteil zur Sicherung der Rohstoffbasis von morgen sein. Die Substitutionsbemühungen müssen dabei zum Ziel haben, zumindest gleichwertige Produkte bzw. Anwendungen zu erzeugen. Sicherheitsbedenken im Umgang mit alternativen Materialien, Prozessen und Produkten sollten geprüft und Maßnahmen zur sicheren Handhabung entwickelt werden.
11. Es ist nicht zielführend, zusätzlich zu bestehenden Einschränkungen der Rohstoffverfügbarkeit weitere Limitierungen hinzuzufügen. So darf die Toxizität eines Stoffes nicht ausschlaggebendes Kriterium für seine Anwendbarkeit sein. Vielmehr müssen die Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass **toxische Substanzen sicher gehandhabt** und in Hochtechnologieanwendungen eingebracht werden können. Dies ist umso wichtiger, als Europa bzw. Deutschland in noch viel stärkerem Maß als bisher gezwungen sein werden, ihre internationale Wertschöpfung über Hochtechnologieprodukte zu generieren.
12. Eine **breite Öffentlichkeitsarbeit** ist erforderlich, um die **Akzeptanz von Recyclingprodukten** zu fördern. Ebenso muss z.B. bei Entscheidungen zur Neuerrichtung oder Erweiterung von Anlagen in der Bevölkerung und bei Entscheidungsträgern ein Bewusstsein dafür geschaffen werden, dass die Sicherung unseres Lebensstandards auch einschließt, dass potentiell gefährliche Substanzen gehandhabt werden müssen.
13. Ein früher **Austausch zwischen der produzierenden Industrie und den Entwicklern neuer Werkstoffe mit der Recyclingindustrie** soll gefördert werden, um Recyclingfragen schon bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen (Design for Recycling) und der Recyclingindustrie bei neuen Werkstoffen Vorlauf für die Entwicklung von Recyclingverfahren zu geben.

3. Sachstandsanalysen



© Graphit Kropfmühl GmbH

Nachfolgend werden Sachstandsanalysen zu einzelnen Rohstoffen vorgenommen. Ihre Auswahl orientiert sich an ihrer Bedeutung in der industriellen Produktion. Daher hat nicht nur die von der EU-Kommission 2014 veröffentlichte Liste der kritischen Elemente Eingang in dieses Positionspapier gefunden, sondern z.B. auch Aluminium, Eisen, Kupfer, Zink und Zinn, die als Basismetalle sowie Legierungsbildner unverzichtbar sind.

3.1. Aluminium

3.1.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Aluminium zählt wie Beryllium und Magnesium zu den Leichtmetallen und wird in großen Mengen beispielsweise in der Bauindustrie, im Kraftfahr- und Flugzeugbau, im Maschinenbau und in der Verpackungsindustrie eingesetzt. Es wird dabei häufig in Form von Legierungen genutzt, da deren Festigkeiten höher sind und die Korrosionsbeständigkeit mindestens genauso hoch ist wie bei reinem Aluminium. Wichtige Legierungselemente sind Kupfer, Magnesium, Mangan, Silicium und Zink, welche meist nur in wenigen Prozenten dem Aluminium zulegiert werden. Steigende Bedeutung erlangten Aluminium-Magnesium-Legierungen, da deren geringes spezifisches

Gewicht, kombiniert mit der hohen Festigkeit, zur Kostenreduzierung in den Bereichen Kraftfahrzeugbau und Luftfahrtindustrie beiträgt.

Die weltweite Raffinerieproduktion an Aluminium betrug im Jahr 2014 ca. 53 Mio. t, davon entfielen ca. 0,5 Mio. t auf Deutschland, womit das Land unter den 15 größten Produzenten rangiert. Hauptproduzent von Primäraluminium ist China mit 23,3 Mio. t. Einen bedeutenden Anteil nimmt das Sekundäraluminium ein. So sind in Deutschland 0,6 Mio. t zusätzlich zum primär erzeugten Aluminium aus sekundären Quellen generiert worden.

Es wird von einer weiter steigenden Nachfrage nach Aluminium ausgegangen. So betrug die Steigerungsrate seit 2011 stets zwischen 5 und 10%. Man geht davon aus, dass

im Jahr 2020 35% des weltweiten Aluminiumbestandes auf den Bausektor und 28% auf den Transportsektor/Fahrzeugbau entfallen werden.

Wichtige Verbindungsformen des Aluminiums stellen, abgesehen von Keramik- und Tonprodukten auf Basis von Alumosilikaten, Aluminiumhydroxid und Aluminiumoxid dar. Sie sind die Rohstoffe zur Aluminiumproduktion und werden aus Bauxit gewonnen. Im Jahr 2009 wurden weltweit etwa 77 Mio. t Aluminiumoxid hergestellt. Nicht zur Metallherstellung genutztes Aluminiumoxid dient der Herstellung von Feuerfest-, Schleif-, Keramik-, Glas- und Emailprodukten sowie von Elektrokorund. Desweiteren findet es als Adsorbens, Katalysatorgrundstoff sowie als Füllstoff in Polymeren (Polyester, Epoxide) Verwendung. Aluminiumhydroxid, das nicht über Aluminiumoxid in metallisches Aluminium überführt wird, dient als Rohstoff zur Herstellung weiterer Aluminiumverbindungen, wie beispielsweise Aluminiumfluorid, synthetischer Kryolith oder Natriumaluminat. Zudem wird es zu Aktivtonerden umgesetzt und in fein verteilter Form als Flammschutzmittel und Füllstoff in Teppichbodenbelägen, Kunst- und Schaumstoffen genutzt. Aluminiumsulfat wird hauptsächlich in der industriellen Abwasserbehandlung sowie Wasserreinigung eingesetzt. Daneben kommt es in der Papierindustrie zum Einsatz. Aluminiumchlorid dient vor allem als Katalysator bei Friedel-Crafts-Alkylierungen und -Acylierungen von Aromaten. Polyaluminiumchloride sind seit langem erfolgreich im Bereich der Wasseraufbereitung als Flockungs- und Fällungsmittel im Einsatz. Natriumaluminat wird ebenfalls als Flockungsmittel genutzt. Außerdem findet diese Verbindung im Bausektor zur Beschleunigung der Betonhärtung Verwendung, dient zur Herstellung von Katalysatoren (Alumosilikate und Zeolithe) und wird in der Papierindustrie benötigt. Triethylaluminium wird als Bestandteil von Ziegler-Natta-Katalysatoren für die großtechnische Herstellung von Polyolefinen eingesetzt.

3.1.2. Vorkommen

Aluminium steht nach Sauerstoff und Silicium an dritter Stelle der Elementhäufigkeit. Es liegt in der Natur überwiegend oxidisch vor und ist oft mit Oxiden anderer Elemente vergesellschaftet. Bekannte Beispiele sind Feldspäte (Kalifeldspat, Anorthit) oder deren Verwitterungsprodukte, die Tonminerale (Kaolinit) oder Glimmer (Muskovit). Für die Aluminiumherstellung sind jedoch die aus den Tonen durch Verwitterung entstandenen Bauxite von wesentlicher Bedeutung. Diese stellen ein Gemenge aus verschiedenen Aluminiumoxidhydraten bzw. -hydroxiden mit Alumosilikaten, Eisen- und Titanoxiden u. a.

dar. Die Al_2O_3 -Gehalte liegen meist zwischen 50 und 65%. Im Jahr 2011 betrug die weltweite Bergwerksförderung 241,1 Mio. t. Die wichtigsten Förderländer sind Australien, China, Brasilien, Guinea und Indien.

3.1.3. Gewinnungstechnologien

Die Herstellung von Aluminium erfolgt durch Schmelzflusselektrolyse von Aluminiumoxid nach dem 1886 entwickelten Hall-Héroult-Prozess. Es handelt sich um eine Elektrolyse der Schmelze eines eutektischen Gemisches von sehr reinem Aluminiumoxid (10,5 Gew.-%) und Kryolith (89,5 Gew.-%) bei Temperaturen um 960 °C. Aluminium wird an der als Bodenauskleidung vorliegenden Kohlenstoffkathode abgeschieden und flüssig abgezogen. An der ebenfalls aus Kohlenstoff bestehenden Anode entsteht Sauerstoff, der den Kohlenstoff in CO_2 bzw. auch CO überführt. Dadurch verbrauchen sie sich und müssen ständig erneuert werden. Der Verbrauch ist mit etwa 0,4 – 0,5 kg/kg Aluminium sehr hoch. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt, ausgehend vom Primärrohstoff Bauxit, etwa 13 – 18 MWh pro t Aluminium.

Die Ausgangsstoffe Al_2O_3 und Na_3AlF_6 müssen erst hergestellt werden. Beim Aluminiumoxid erfolgt dies nach dem Bayer-Verfahren, einem alkalischen Druckaufschluss von SiO_2 -armem Bauxit, anschließender Fällung von $\text{Al}(\text{OH})_3$ und dessen Calcinierung zu $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Kryolith dient zur Senkung des Schmelzpunktes und bildet den Hauptanteil des Elektrolyten. Weitere Zusätze sind beispielsweise Fluoride, wie LiF und AlF_3 . Teilweise werden sie erst in situ gebildet. Lithiumfluorid bewirkt eine Temperatursenkung, verbessert die Leitfähigkeit, erhöht die Energieausbeute und vermindert die Fluoremission. Aluminiumfluorid gleicht Kryolithverluste aus.

Die sehr energieintensive Gewinnung von Aluminium führt dazu, dass in westlichen Industrieländern der Energieanteil bis zu 40% der Produktionskosten beträgt.

3.1.4. Recycling

Die Wiederaufarbeitung von Alt-Aluminium benötigt nur etwa 4% der Energie, die zur Erzeugung aus Bauxit benötigt wird. Es ist somit ein wichtiger Beitrag zur Energieeinsparung und ökonomisch, aber auch ökologisch von hoher Bedeutung. Die Recyclingraten sind jedoch sehr unterschiedlich und auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Während sie in Deutschland bei knapp 60% liegt, ist der weltweite Durchschnitt lediglich bei 22%. Grund-

sätzlich kann Aluminium ohne Verlust seiner Eigenschaften recycelt werden.

3.1.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird vor allem darin gesehen, nicht sortenreine, aluminiumhaltige Legierungen (Al-Mg, Al-Mg-Zn) aufzuarbeiten. Hier kommt dem Erfassen eine große Bedeutung zu. Denn nur, wenn eine sortenreine Sammlung erfolgt, können diese Legierungen vollständig recycelt werden, was jedoch häufig nicht der Fall ist. Weil Legierungselemente (Mg) beim Umschmelzen nicht entfernt werden können, findet Downcycling statt.

3.2. Antimon

3.2.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Anwendungsgebiete des Antimons und seiner Verbindungen unterlagen in den letzten Jahren einem Wandel. Metallisches Antimon wurde in der Vergangenheit vor allem als Legierungselement (weltweit 11,5% der Antimon-Verbrauchsmenge, Stand 2011) verwendet, da es in vielen Legierungen die Härte steigert, die Schrumpfung verringert sowie Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit erhöht. In diesem Zusammenhang ist vor allem Hartblei zu nennen. Hartblei findet Anwendung in Trägergittern von Bleiakkumulatoren (sogenannten „grids“), Bedachungen, Tankauskleidungen, Rohren und Pumpen für Chemikalien, Kabelummantelungen und Munition. Vor allem die Anwendung von Hartblei in Blei-Säure-Batterien (25,9%) für Fahrzeuge dominierte lange Zeit. In modernen Bleiakkumulatoren wird Antimon jedoch zunehmend durch andere Legierungselemente substituiert. Durch veränderte Anforderungen an die Grids wird sich dieser Trend wohl auch in Zukunft fortsetzen. Inzwischen entfällt der Großteil des globalen Antimonbedarfs auf oxidische Antimonverbindungen (> 65%) wobei in erster Linie Antimontrioxid (Sb_2O_3 ; ATO) zu nennen ist. Antimontrioxid wird hauptsächlich als Flammschutzmittel in Kunststoffen (52,4% des Weltverbrauchs) eingesetzt, findet aber ebenfalls Anwendung als Katalysator in der PET-Produktion (5,9 %) sowie in der Glas- und Keramikindustrie. Da ATO als Synergist zu (halogenhaltigen) Flammschutzmitteln eingesetzt wird, ist sein Einsatz u.a. abhängig von deren Zulässigkeit und Einsatzmenge. Substantielle Antimon-Sekundärmengen aus der Kreislaufführung sind lediglich aus dem Batterie-Recycling verfügbar, für die sonstigen Anwendungsfelder existieren keine technischen Recyclingverfahren, so dass die Recyclingrate unter 5% liegt.

3.2.2. Vorkommen

Die Lage auf dem Antimonweltmarkt ist aufgrund der Bedeutung des Elementes für Industrienationen bei gleichzeitiger Seltenheit und ungleicher Verteilung der Vorkommen seit geraumer Zeit angespannt. Von den 2011 durch USGS geschätzten weltweiten Antimonreserven in Höhe von 1,83 Mio. t befinden sich über 50% auf chinesischem Staatsgebiet. Weitere nennenswerte Vorkommen finden sich in Russland, Bolivien, Kirgistan und Bolivien. Auf Seiten der globalen Bergwerksproduktion ist der chinesische Anteil mit über 70% sogar noch höher zu bewerten. Auch der chinesische Anteil an der Primärantimonweltproduktion bewegt sich in dieser Größenordnung. Der globale Antimonverbrauch beträgt derzeit etwa 200.000 t/a. Dieser Bedarf kann in der jüngeren Vergangenheit nicht durch Primärproduktion (diese wird auf etwa 100.000 bis 150.000 t/a geschätzt) und Recycling gedeckt werden. Die negative Marktbilanz in Kombination mit der starken chinesischen Marktposition und reglementierten Exportpolitik führt zu einer äußerst volatilen Preisentwicklung bei gleichzeitiger Versorgungsunsicherheit. Aufgrund dessen hat die EU im Jahr 2014 Antimon vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Bedeutung erneut auf die Liste der kritischen Rohstoffe aufgenommen.

3.2.3. Gewinnungstechnologien

Natürliche Antimonminerale liegen häufig vergesellschaftet mit Kupfer, Blei, Gold und Silber vor. Die bedeutendste Antimonverbindung bildet Stibnit (Sb_2S_3). Der Abbau antimonhaltiger Mineralien erfolgt sowohl im Tagebau als auch im Untertagebau. Die Aufbereitung der Erze zum Antimonkonzentrat erfolgt durch Brechen, Mahlen, Schwere-trennung und Flotation. Besonders im asiatischen Raum spielt auch händische Sortierung eine Rolle. Antimonär-mere Konzentrate (~20 Gew.-% Sb) werden anschließend geröstet und das entstehende flüchtige Sb_2O_3 über den Abgasstrom aufgefangen. Aufgrund der Verunreinigungen kann es nicht direkt als Antimontrioxid eingesetzt werden und wird durch Reduktion zu metallischem Antimon weiterverarbeitet. Hochantimonhaltige Konzentrate mit über 45 Gew.-% Sb werden unter reduzierender Atmosphäre bei 550-600 °C eingeschmolzen. Die flüssig abgetrennte Sb_2S_3 Phase wird anschließend geröstet und im Anschluss zu Antimon reduziert. Es existieren ebenfalls hydrometallurgische Verfahren zur Antimongewinnung. Über eine Kombination aus Laugung und Elektrolyse lässt sich aus den Konzentraten hochreines Antimon gewinnen.

3.2.4. Recycling

Der Recyclingbeitrag betrug im Jahr 2011 insgesamt etwa 38.000 Tonnen (Roskill Information Services Ltd. 2012). Dabei ist die Sekundärgewinnung von Antimon sehr differenziert zu betrachten. Der Großteil des sekundären Antimons stammt aus dem Recycling von Bleiakкумуляtoren und wird in diesem Sektor auch wieder eingesetzt. Die grids werden vornehmlich in Schacht- und Kurztrommelöffnen eingeschmolzen und wieder zu Hartbleilegierungen und Feiblei verarbeitet. Auch andere antimon- und bleihaltige Produkte werden auf diese Weise aufgearbeitet. Im Gegensatz dazu erweist sich jedoch das Recycling der Antimonströme aus dem mittlerweile bedeutenderen Kunststoffsegment als äußerst schwierig. Grund dafür sind vor allem die niedrigen Gehalte an Antimonoxiden in den Kunststoffprodukten. Recyclingraten auf diesem Sektor betragen weniger als 5% (Graedel u.a. 2011). Antimon in zukünftigen metallurgischen Anwendungen, z.B. als Substituent für andere kritische Metalle in Halbleitern, ist bisher kaum bis gar nicht wiedergewinnbar (Schwarz-Schampera 2014; 85). Diese Anwendungen stellen damit eine große Herausforderung sowohl für Rückgewinnungstechnologien, aber vor allem für geplante Rezyklierbarkeit in technischen Designstrategien dar.

3.2.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der zentrale Forschungs- und Entwicklungsbedarf liegt im Bereich des Antimonrecycling. Dabei ist vor allem die Rückgewinnung von Antimon aus flammgeschützten Polymeren zu adressieren. Weiterhin besteht Bedarf, das Recycling aus Hartbleilegierungen an den Rückgang des Einsatzes in Starterbatterien und erhöhte Nachfrage nach Antimontrioxid anzupassen. Falls Antimon als Technologiemetall weiter an Bedeutung gewinnen sollte, da es in der Halbleitertechnologie in Form von Antimon-Zinn-Oxid als Substitut für Indium-Zinn-Oxid genutzt werden könnte, so gilt es auch hier geeignete Recyclingtechnologien zu entwickeln. Schlussendlich ist die verbesserte Nutzung von antimonhaltigen Rückständen der primären und sekundären Bleiindustrie zu nennen. Dort fallen komplexe Mischoxide an, die sich trotz Antimongehalten von etwa 30 Gew.-% innerhalb Europas kaum wirtschaftlich aufbereiten lassen und deshalb häufig in den asiatischen Raum exportiert werden.

3.3. Beryllium

3.3.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Beryllium ist ein verhältnismäßig seltenes Element und zählt zusammen mit Aluminium und Magnesium zu den Leichtmetallen. Beryllium wird hauptsächlich in zwei verschiedenen Erscheinungsformen verwendet. Jährlich werden weltweit etwa 50 t als pures Berylliummetall verarbeitet, wobei auf Deutschland etwa 1 t/a entfällt. Der weitaus größere Anteil von Beryllium wird zur Herstellung von Kupfer-Berylliumlegierungen mit einem Anteil von 0,5–2,5% Beryllium eingesetzt (aushärtbare Berylliumbronzes), z.B. für elektrische Bauteile. Hierbei beträgt der Berylliumanteil in Kupferlegierungen weltweit ca. 350 t/a und in Kupferlegierungen in Deutschland ca. 22 t/a. Aufgrund seines hohen Schmelzpunktes von 1.287 °C gehört es zu den hochschmelzenden Metallen. Es findet wegen seiner Verwindungsfestigkeit, seines geringen Gewichtes, seines geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der hohen gewichtsbezogenen Elastizitätsmodule und der hohen Zugfestigkeit vorwiegend in der Luft- und Raumfahrt als Reinmetall und in Form von Beryllium-Basislegierungen Anwendung. Weitere Schlüsselindustrien, in welchen hauptsächlich Kupferberyllium eingesetzt wird, sind die Automobilindustrie, Solarindustrie, Elektroindustrie, Militärtechnik, metallverarbeitende Industrie und Medizintechnik. Wegen seiner interessanten kernphysikalischen Eigenschaften ist Beryllium ein attraktives Moderator- und Reflektormaterial. Allein in der deutschen Elektroindustrie sind 842.000 Arbeitsplätze in unterschiedlichen Bereichen von der Beryllium-Versorgung abhängig.

3.3.2. Vorkommen

Die kommerziell wichtigen Mineralien sind Beryll $3 \text{ BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{ SiO}_2$, und Bertrandit, $4 \text{ BeO} \cdot \text{SiO}_2$. Hauptsächlich Beryll kommt als industrieller Rohstoff in Frage und enthält in Reinform rund 14% BeO, 19% Al_2O_3 und 67% SiO_2 . Die Ressourcen werden auf 80.000 t BeO geschätzt, davon 65% in den USA. Sie werden vorwiegend in den USA (88%), China (10%) und Mosambik (1%) gefördert und zu Berylliumverbindungen wie $\text{Be}(\text{OH})_2$ oder BeO aufgearbeitet. Die USA sind der weltweit bedeutendste Produzent (90%) für Beryllium und seine Verbindungen und fördern jährlich rund 300 t Berylliumerz.

3.3.3. Gewinnungstechnologien

Beryllium wird hauptsächlich als metallisches Beryllium, Berylliumhydroxid und Berylliumfluorid gehandelt. Metallisches Beryllium wird entweder durch Reduktion von Berylliumfluorid mit Magnesium im Graphittiegel bei höheren Temperaturen oder – seltener – durch Schmelzflusselektrolyse von Berylliumchlorid hergestellt. Das bei der Aufarbeitung von Beryll bzw. Bertrandit erhaltene BeCO_3 wird in wässriger Lösung im Autoklaven auf 165 °C erhitzt und so das CO_2 ausgetrieben. Das ausgefällte Be(OH)_2 wird durch Filtration gewonnen. Nach dem Schwenzfeier-Verfahren wird Be(OH)_2 durch Zugabe von Ammoniumhydrogenfluoridlösung unter Bildung von Ammoniumfluoroberyllat, $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$, gelöst und nach Neutralisation durch Zugabe von Fällungsreagentien wie CaCO_3 von Verunreinigungen befreit. Das gereinigte Fluoroberyllat wird durch Eindampfen unter Vakuum auskristallisiert und der Feststoff im Induktionsofen unter Bildung einer BeF_2 -Schmelze erhitzt, aus der nach Abkühlen BeF_2 als glasartige Phase gewonnen wird.

3.3.4. Recycling

Die Recyclingquote für Beryllium ist gering. Werte von ca. 10% dürfen als gesichert gelten, es wird auch von Anteilen bis zu 25% berichtet. Eingesetzt werden typischerweise Produktionsabfälle, wozu Beryllium selbst wie auch Berylliumlegierungen zählen. Der Energieverbrauch für die Berylliumproduktion aus Sekundärrohstoffen beträgt ca. 20% des Wertes für aus Primärrohstoffen produziertes Material.

3.3.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Es wird in vielen Bereichen wie z.B. in der Luft- und Raumfahrt konsequent nach weiteren Anwendungen von Beryllium geforscht, da Beryllium-Legierungen wegen der besonderen Eigenschaften für die anspruchsvolle Elektronik von heute unverzichtbar sind, um Innovationen bei höherer Zuverlässigkeit und fortschreitender Miniaturisierung zu ermöglichen.

3.4. Borate

3.4.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Der Verbrauch an Borverbindungen, gerechnet als Boroxid, lag 2010 weltweit bei 1,5 Mio. t mit stark steigender Tendenz. Für 2014 wird der globale Verbrauch auf 2,0 Mio. t geschätzt. Überwiegend werden Natriumborate verwendet (als rohes Erzkonzentrat, das oft direkt eingesetzt wird, oder in gereinigter bzw. calcinierter Form). Der kleinere Teil betrifft Calcium- bzw. Calciumnatriumborate (Colemanit, Ulexit), die ebenfalls oft direkt verwendet werden, z. B. bei der E-Glasfaserherstellung und bei der Stahlfabrikation. Sonstige Produkte wie Borsäure, Boroxid usw. Natriumborat kommen hauptsächlich in der Glas-, Keramik-, Email- und Porzellanindustrie zum Einsatz (z. B. Borosilikatgläser mit 12–15% B_2O_3 als Flussmittel und zur Herabsetzung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten; Glaswolle mit 5–7% B_2O_3 für Isolationszwecke; Glasfasern mit 8–9% B_2O_3). Es dient ferner zur Herstellung von Natriumperborat (Wasch- und Reinigungsmittel), Düngemitteln (Bor ist ein notwendiges Spurenelement für die Pflanzenernährung; man nimmt es auch zur Bekämpfung der Herzfäule bei Rüben) und Korrosionsschutzmitteln in Antifrostmitteln. Auch für metallurgische Zwecke (Fluss-, Schweiß- und Lötmassen) und für Flammschutzmittel in Zellulosematerialien findet es Verwendung. In den USA ist der Einsatz für die Natriumperboratherstellung wegen der unterschiedlichen Waschmittelzusammensetzungen bzw. Waschgewohnheiten geringer, dagegen im Glas-, Glasfaser- und Glaswollesektor höher.



© Fotolia

Natriumborate sind die wichtigsten technischen Borverbindungen. Sie werden zum großen Teil als solche verwendet, sie dienen aber (neben den Calciumboraten) auch als Ausgangsprodukte zur Herstellung aller anderen kommerziell interessanten Borverbindungen (Borsäure, Boroxid, anorganische Borate, refraktäre Borborate, Borcarbid, Bornitrid, Boride, elementares Bor, Ferrobor, Borhalogenide, Fluorborate, Borhydride, Organoborverbindungen).

Bor ist ein wichtiger Bestandteil in Neodym-Eisen-Bor, dem wirtschaftlich bedeutendsten Permanentmagnetmaterial mit hohen Energiedichten. Allerdings liegt bei einer geschätzten Jahresproduktion weltweit von ca. 100.000 t Neodym-Eisen-Bor der absolute Borbedarf für diesen Anwendungsfall bei < 1 Promille der Jahresproduktion. Außerhalb Deutschlands, z.B. in China, Russland und Indien, wird es aufgrund der zunehmenden Nutzung der Kernenergie benötigt. Hier kommt es u.a. als Absorbiermaterial der Steuerstäbe im Kernreaktor zum Einsatz.

3.4.2. Vorkommen

Vier Mineralien machen 90% der Borate aus, die weltweit industriell genutzt werden: Die Natriumboratminerale Tinkal (roher Borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) als das wichtigste Bormineral und Kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$), sowie Calciumborat Colemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) und das Natriumcalciumborat Ulexit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$). Die Vorkommen liegen in den USA (Boron, Kalifornien – die größte Produktionsstätte der Welt), Türkei, Chile, Argentinien, Peru, China und den GUS-Staaten. Hauptförderländer sind die USA und die Türkei bei einer Gesamtförderung an Bormineralien, die 2010 bei etwa 6 Mio. t lag. Die wichtigsten Bormineralien, die derzeit in der Türkei gefördert werden, sind Calciumborate. Natriumborate werden auch als Nebenprodukte der Kalisalzgewinnung aus dem weitgehend eingetrockneten Searles-Salzsee in Kalifornien gewonnen. Auch das Meerwasser enthält nennenswerte Mengen Bor (0,001%). Es kann hieraus über Ionenaustauscher gewonnen werden. Die gesamten Weltreserven an Borverbindungen wurden 2011 mit 210 Mio. t B_2O_3 angegeben. In der Türkei werden die größten Vorräte (> 60 Mio. t) angenommen.

Auf dem Stand des gegenwärtigen Borverbrauchs sowie der derzeitigen Borproduktion von ca. 4 Mio. t/a werden die Ressourcen daher als auf absehbare Zeit ausreichend angesehen.

In der EU gibt es keine Produktion aus heimischen Quellen, dagegen konzentriert sich die Borgewinnung auf wenige Staaten.

3.4.3. Gewinnungstechnologien

Reine Natriumtetraborate werden aus zerkleinerten rohen Natriumboratminerale (Tinkal, Kernit) durch Auflösen (unter Erhitzen) in einer schwach boraxhaltigen Mutterlauge, Abtrennen der Verunreinigungen (Tone) und selektive Kristallisation gewonnen. Je nach Temperatureinstellung (über oder unter $60,8 \text{ }^\circ\text{C}$) der Vakuumkristallisation entsteht Penta- oder Decahydrat.

Auch aus Calciumboraten wird Borax hergestellt, wobei durch Erhitzen mit Soda/Natriumhydrogencarbonat/Natronlaugelösung das Calcium gefällt und Natriumborat kristallisiert wird. Wasserfreier Borax entsteht durch Calcinierung von wasserhaltigen Natriumboraten zunächst im Drehrohfen, dann im stehenden Ofen; das gebildete Produkt fällt in flüssiger Form an und wird z. B. in Formen gegossen. Andere Natriumborate (Natriummetaborate, z. B. $\text{NaBO}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, Natriumpentaborat $\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) sind von untergeordneter Bedeutung.

Der Verbrauch von Bornitrid (z.B. bei Schleif-, Zerspaltungs- und Trennprozessen) wird voraussichtlich weiter steigen, was die Entwicklung neuer Verfahren erfordert, die Bornitrid verarbeiten und hohe Produktionsvolumina gestatten.

3.4.4. Recycling

Die Recyclingrate für Bor ist gering. Das Borrecycling konzentriert sich im Wesentlichen auf den Wiedereinsatz borhaltiger Gläser. Aus Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten kann es ein Verfahren, das sich gegenwärtig in der Überführung in den technischen Maßstab befindet, nahezu vollständig zurückgewonnen werden. Die Menge an aus Magneten recycelbarem Bor muss indes als gering eingestuft werden. Die Wirtschaftlichkeit eines Borrecyclings gegenüber Primärborqualitäten wird kritisch eingeschätzt.

3.4.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die EU hat verschiedene Borverbindungen im Juni 2014 auf die sogenannte „Kandidatenliste“ („Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe“) der Europäischen Chemikalienagentur gesetzt, nachdem eine EU-Studie ergeben hatte, dass die kontinuierliche Exposition gegenüber Borverbindungen gesundheitliche Beeinträchtigungen nach sich ziehen kann. Die Hersteller von Waschmitteln sind daher gehalten, den Borgehalt ihrer Produkte zu minimieren und durch andere Zusätze zu ersetzen.

Zwar lassen sich Bor bzw. Borverbindungen in Waschmitteln und Seifen sowie Keramiken und Isolatoren durch andere Ausgangsstoffe ersetzen. Derzeit gibt es aber mit Ausnahme von Natriumpercarbonat als Substitut für Natriumperborat keine weitergehenden Substitutionskonzepte.

3.5. Chrom

3.5.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Chrom findet zu über 90% Verwendung in der Produktion von Edelstahl und Superlegierungen. Darüber hinaus werden diverse Chromchemikalien und -farbstoffe produziert sowie Gießereisande und Produkte der Feuerfest-Industrie.

Chrom wurde im Mai 2014 durch die EU auf die Liste der kritischen Materialien aufgenommen. Südafrika dominiert den Weltmarkt bei der Chromförderung. Chromit (FeCr_2O_4) ist das einzige wirtschaftlich relevante Erzmineral von Chrom.

Tabelle 1: Reserven und Bergbauproduktion von Flussspat (USGS 2015):

	Bergbauproduktion (kt)		Reserven (kt)
	2013	2014	
USA	k.A.	k.A.	620
Indien	2.950	3.000	54.000
Kasachstan	3.700	4.000	230.000
Südafrika	13.700	15.000	200.000
Türkei	3.300	2.400	k.A.
Andere	5.150	4.600	k.A.
Welt gesamt	28.800	29.000	> 480.000

Die wichtigsten Produzenten sind Südafrika (etwa 50% der Weltproduktion), Kasachstan (14%) und Indien (10%). Die weltgrößten Reserven liegen in Kasachstan, daher besteht vor allem dort ein beträchtliches Entwicklungspotenzial in der Produktion.

Die Importe in die EU erfolgten 2012 fast ausschließlich aus Südafrika (80%) und der Türkei (16%). Das Wachstum des Chrombedarfs bis 2020 wird auf jährlich zwischen 4–5% geschätzt.

Das wichtigste aus Chromit hergestellte Produkt ist Ferrochrom. Dieses bildet einen wichtigen Legierungsbestand-

teil für die Produktion von Stählen, Edelstählen und Superlegierungen.

Die Produktion diverser Chrom-Chemikalien wird in den Ländern der westlichen Welt aufgrund deren Umweltproblematik nach und nach reduziert, erfährt jedoch durch die stark steigende Produktion in asiatischen Wachstumsmärkten insgesamt einen Zuwachs.

Die Anforderungen der verschiedenen Einsatzzwecke bestimmen auch die zu erzeugenden und gehandelten Konzentrate. Man unterscheidet folgende Qualitäten typischer Chromitkonzentrate:

- » für die Metallurgie: 48% Cr_2O_3 mit einem Verhältnis Cr:Fe von 3:1
- » für Feuerfestanwendung: > 57% $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ und Cr:Fe 2,0-2,5:1
- » für Gießereisande: > 44% Cr_2O_3 , < 26% Fe_2O_3 und < 0,5% Tonminerale
- » für chemische Anwendungen: 44–46% Cr_2O_3 und Cr:Fe von 1,5-2,1:1

Darüber hinaus sind individuelle Bestimmungen zur Korngrößenverteilung zu beachten.

3.5.2. Vorkommen

Chromit kommt in den meisten Ländern der Welt vor, meistens jedoch in nicht abbauwürdigen Mengen. Das wahrscheinlich größte zusammenhängende Chromitvorkommen ist nach derzeitiger Kenntnis der Bushveld-Komplex in Südafrika, einem geschichteten Intrusivkomplex basischer Schmelzen. Abgesehen vom vorhandenen Chromit sind hier jedoch auch die Platingruppenelemente von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Neben den geschichteten magmatischen Komplexen sind podiforme („linsenförmige“), ophiolitische Lagerstätten eine wichtige Quelle von Chromit.

Die bekannten Ressourcen an Chromit betragen weltweit etwa 12 Mrd. Tonnen. Großes Potential bieten neben Südafrika auch Kasachstan, Simbabwe (Great Dyke) und Indien. In Europa produzieren mehrere Betriebe in der Türkei, sowie das Bergwerk Kemi in Finnland.

3.5.3. Gewinnungstechnologien

Chromit wird bergmännisch, sowohl unter- wie auch über Tage, abgebaut. Das Roherz wird zerkleinert und mittels

Dichtesortierung aufbereitet. Schwertrüben können als Vorsortierung dienen, an deren Anschluss durch einen Klassierungsschritt Stückerz („lumpy ore“) vom Feinkorn abgetrennt wird. Zur Aufbereitung des Feinkornanteiles werden üblicherweise Wendelscheider sowie in manchen Fällen Schüttelherde eingesetzt.

Da es sich um einen Massenrohstoff handelt, bestehen die Herausforderungen insbesondere in der Senkung der Gewinnungs- und Aufbereitungskosten. Zudem ist im Feinkornbereich die dosierte und gleichmäßige Aufgabe auf die Wendelscheider-Batterien nicht unproblematisch. Ein Lösungsansatz ist eine automatisierte, kontinuierliche Überwachung und Steuerung des Prozesses.

3.5.4. Recycling

Das Recycling von Chrom findet in großen Mengen über die Rückführung von Edelstahlchrotten in den Materialkreislauf statt. Chrom aus chemischen Anwendungen wie beispielsweise in der Gerberei kann durch Ausfällung aus der Lösung rückgewonnen werden.

Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen gibt es derzeit bezüglich des Recyclings von Chrom aus behandelten Endprodukten wie beispielsweise gegerbten Lederwaren oder verwitterungsgeschütztem Holz.

3.5.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in einer unkomplizierten Technik zur Automatisierung der gravimetrischen Aufbereitung, in der Entwicklung von Verfahren zur Gewinnung von Ferrochrom aus verglasten Schlacken und in der Entfernung von Chromverbindungen aus diversen Endprodukten wie z.B. gegerbten Ledern. Zudem ist Chrom derzeit praktisch nicht substituierbar, was zu einer Minderung der daraus resultierenden Kritikalität des Rohstoffes weiteren Forschungsbedarf notwendig erscheinen lässt.

3.6. Edelmetalle inkl. Metalle der Platingruppe

Gold (Au), Silber (Ag), Quecksilber (Hg), Platin (Pt), Palladium (Pd), Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Iridium (Ir), Osmium (Os)

3.6.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Weithin bekannt ist die Bedeutung der Edelmetalle aufgrund ihres Wertes und ihrer geringen Korrosionsanfälligkeit bei der Schmuckherstellung (v.a. Au, Ag, Pt) und dem volkswirtschaftlich wichtigen sogenannten Anlagegold. Während aber in diesen Anwendungen Recyclingraten vergleichsweise hoch und Versorgungsrisiken eher gering sind, zählen die Metalle der sogenannten Platingruppe (Pt, Pd, Ru, Rh) laut der Europäischen Kommission aufgrund ihrer hohen Angebotskonzentration, schlechten Substituierbarkeit und niedrigen Recyclingraten in einigen Anwendungen zu den kritischen Rohstoffen (Europäische Kommission 2014). Platingruppenmetalle (PGM) sind in der industriellen Anwendung von besonderer Relevanz in katalytisch unterstützten chemischen Prozessen und in elektronischen Geräten. Der industrielle Bedarf an Edelmetallen insgesamt erstreckt sich dabei auf sehr vielfältige Anwendungsfelder von chemischen Prozessen, Elektronik und Energietechnik über Medizintechnik und Pharmazeutika bis hin zu Gläsern, Keramiken und Pigmenten (Sitzmann & Schwab 2011). Mehr als die Hälfte der weltweit primär produzierten Platingruppen-Metalle (ca. 451 t in 2012, U.S. Geological Survey 2014) wird heute in automobilen Abgaskatalysatoren eingesetzt, bei Platin entfallen rund 40% der Nachfrage auf Autokatalysatoren,



Leiterplatten – eines der Ausgangsprodukte für das Recycling von Edelmetallen (Foto: Umicore AG & Co. KG)

bei Palladium über 70% und bei Rhodium über 80%. Die Eignung für katalysierte chemische Prozesse zum Beispiel zur Herstellung von Bulk-Chemikalien wie Salpetersäure oder in Hydrier- und Dehydrierprozessen in der Petrochemie macht auch die ebenso zur Platingruppe gehörenden Metalle Ruthenium und Rhodium zu wichtigen und kritischen Ressourcen, die nur schwer zu substituieren sind. Der von der EU verwendete Sustainability-Index beurteilt die Platin-Gruppe mit einem Wert von 0,83 (wobei 0 sehr leicht und 1 sehr schwer substituierbare Stoffe bezeichnet). Während Rhodium wie Platin zu über 50 Prozent in der Automobilindustrie (u.a. auch in Brennstoffzellen) eingesetzt wird, kommt ein Großteil des nachgefragten Rutheniums in elektronischen und elektrischen Geräten (EEE), etwa in Festplatten zum Einsatz.

3.6.2. Vorkommen

Die weltweit größte Edelmetallagerstätte, der Bushveld Complex, befindet sich in Südafrika, wo 2012 ca. 61% der primären Weltproduktion (80% Pt) gefördert wurden (Europäische Kommission 2014). Weitere wichtige Produzenten sind Russland mit 27% (50% Palladium) in Sibirien und Ural und Zimbabwe mit dem Great-Dyke-Vorkommen (5%). Die Hauptvorkommen in Afrika und USA liegen in Edelmetall-dominierten Lagerstätten vor, wo primär Platingruppenmetalle und Nickel bzw. Kupfer als Nebenprodukte gefördert werden. Russische, aber auch kanadische Vorkommen sind zumeist Nickel/Kupfer-dominant und zählen zu den wichtigsten Nickelabbaugebieten, Platingruppenmetalle werden hier neben Gold, Silber, Chrom u.a. als Nebenprodukte gefördert. Nachgewiesene Reserven in den Hauptvorkommen in Südafrika und Russland von Platin und Palladium summieren sich zu ca. 10.000 t (Gunn 2014), die Ressourcen bis 2 km Tiefe liegen aber allein in Südafrika Schätzungen zufolge (auch aufgrund der Tatsache, dass mit dem deutlich steigenden Preisen bisher nicht ausgebeutete Vorkommen wirtschaftlich werden) bei rund 25.000 t (Cawthorn 2010).

Die Produktionsmengen der jeweiligen Erzeugerländer betragen 2012 in Südafrika 148 t/a Pt, 82 t/a Pd, 57 t/a andere (Bushveld Complex) und in Russland bei 27 t/a Pt, 116 t/a Pd, 2,2 t/a andere (Ural, Kondyor, Koryat-Kamchatka). Weitere relevante Produzenten sind USA, Kanada und Zimbabwe. (Gunn 2014).

3.6.3. Gewinnungstechnologien

In sehr geringem Umfang findet in Deutschland Primärgewinnung von Gold aus dem Feinkornanteil der Flusskies-

Gewinnung statt. Dieser Ansatz (Feinkornaufbereitung) stellt – nicht nur für die Edelmetallgewinnung – einen prinzipiell gangbaren und möglicherweise auch wirtschaftlich attraktiven Weg für die Verbesserung der deutschen Rohstoffversorgung dar, da die Wertschöpfungstiefe und das Wertstoffausbringen bereits bestehender Prozesse erhöht werden kann.

Primäre Platinmetalle werden vollständig aus dem außereuropäischen Ausland bezogen, bei Gold und Silber stammen noch kleinere Mengen aus dem europäischen Bergbau. Der Gehalt der heute abgebauten Lagerstätten liegt bei Gold und den PGM im Allgemeinen deutlich unter 10 g/t. Der bergbaulichen Gewinnung im Tief- oder Tagebau schließt sich die Aufbereitung der Erze an. Hierbei werden diese zunächst gebrochen, gemahlen und per Flotation oder mit Dichtentrennverfahren von nicht verwendbaren Mineralien getrennt. Goldvorkommen werden bei feiner Verteilung im Gestein häufig per Cyanid-Laugung und anschließender Fällung gewonnen. Für dieses Verfahren sind aufgrund der Giftigkeit und Korrosivität der Hilfsstoffe industriell gemanagte und gut kontrollierte Prozesse erforderlich.

Die primären Aufbereitungskonzentrate werden mit großtechnischen pyrometallurgischen, elektrochemischen und hydrometallurgischen Verfahren weiterverarbeitet. Am Ende der Kette stehen dann hochreine Edelmetalle sowie häufig eine Reihe von mitgewonnenen Koppelprodukten (z.B. Kupfer, Nickel, Selen, Tellur). Es existieren verschiedene komplexe Verfahrensabläufe, die in der Literatur beschrieben sind (Winnacker-Küchler 2006).

3.6.4. Recycling

Vor allem auf dem Gebiet der Elektroindustrie sind die Recyclingraten aufgrund der unzureichenden Sammlung von Altgeräten, dem teilweisen Einsatz qualitativ schlechter Recyclingverfahren, geringen vorliegenden Konzentrationen und der starken Integration der Bauteile zum Teil äußerst gering. Dies führt etwa beim Ruthenium zu einer gesamten Recyclingquote von nur ca. 10–25% (weniger als 5% aus WEEE) (Hagelüken 2014).

Für das Recycling von Schmuck, bestimmten Katalysatoren und anderen höher haltigen Edelmetallprodukten steht eine Reihe von spezialisierten Scheideprozessen zur Verfügung. Komplexe edelmetallhaltige Materialien wie Elektronikfraktionen (Leiterplatten), organikhaltige Prozesskatalysatoren oder Autoabgaskatalysatoren können am besten in großskaligen integrierten Metallhütten

verarbeitet werden, zum Teil gemeinsamen mit Primärkonzentraten oder Anodenschlämmen aus der Kupferverhüttung. Wie bei der Primärproduktion wird hierbei i.d.R. eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Verfahren eingesetzt. (Hagelüken 2010 & 2014);

Das Recycling von Edelmetallen ist in vielen (industriellen) Bereichen etabliert. So wurden bislang global aus Autokatalysatorabfall insgesamt 900 t Edelmetalle zurückgewonnen. Die Recyclingrate liegt hier weltweit bei etwa bei 60–70%. (Hagelüken 2014). Limitierend ist der Altxport, der ein gezieltes hochwertiges Recycling der Katalysatoren erschwert. Die technischen Recyclingraten in einer modernen Edelmetallscheidung liegen bei über 95%. Bei Schmuck, Münzen/Barren sowie bei chemischen Katalysatoren sind die PGM Verluste äußerst gering, da hier hohe technische Ausbeuten komplementiert werden durch eine nahezu verlustfreie Erfassung von Altmaterial sowie die Nutzung professioneller und transparenter Recyclingketten (geschlossene Kreisläufe) (Hagelüken 2014). Verbesserungsbedarf gibt es insbesondere noch bei der Verwertung von Edelmetallen aus Elektroaltgeräten, deren Recyclingrate derzeit bei <15% liegt. Die Gründe dafür liegen allerdings nicht in fehlender leistungsfähiger Recyclingtechnik, sondern in erheblichen Defiziten bei der Erfassung und Stoffstromverfolgung von Altprodukten und edelmetallhaltigen Fraktionen (Hagelüken 2014).

3.6.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Durch die hohe technische Recyclingfähigkeit von Gold, Silber und der PGM können Recyclingraten von über 95% erreicht werden, sofern PGM-haltige Altmaterialien in modernste Scheideprozesse eingesteuert werden. Zwar bestehen auch hier noch technische Herausforderungen, aber die Haupthindernisse beim PGM-Recycling liegen in der Sicherstellung der Erfassung von relevanten Altprodukten sowie in der technisch-organisatorischen Auslegung der weltweiten Recyclingketten. Wirtschaftliche und legislative Faktoren sind ebenfalls von Bedeutung.

Vor allem die gängigen Methoden der primären Edelmetallgewinnung aber auch Methoden zur Rückgewinnung aus Abfällen sind sowohl energie- und kostenintensiv als auch teilweise ursächlich für massive Umweltbeeinträchtigungen 30% der weltweiten Quecksilberemissionen gehen allein auf die Goldförderung im Kleinbergbau zurück (Blacksmith Institute 2014). Bei der primären Gold- und PGM-Gewinnung werden pro Tonne PGM-Metall, auf Grund der geringen Erzkonzentration und der spezifischen Abbaubedingungen, mehr als 10.000 t CO₂ generiert.

Die Sekundärproduktion in modernen Anlagen ist beim Energiebedarf um ca. Faktor 100 besser, da höher konzentrierte Edukte verarbeitet werden und der sehr energieintensive Mahlaufschluss von Edelmetallerzen entfällt. In Anbetracht der teilweise sehr geringen Recyclingraten vor allem von in Elektronik eingesetzten Edelmetallen besteht Bedarf an weiterer Forschung und Entwicklung von innovativen Systemen zur Erfassung und Stoffstromverfolgung von Altgeräten sowie zur verlustminimierten Abtrennung von edelmetallhaltigen Komponenten aus komplexen Produkten. Wichtig ist die Verfolgung eines gesamtheitlichen Systemansatzes, der Wechselwirkungen innerhalb der Recyclingkette berücksichtigt (sowohl zwischen den einzelnen Stufen der Kette als auch zur Rückgewinnung anderer in den Produkten enthaltenen Metalle). Der zu betreibende Aufwand zur Rückgewinnung von Edelmetallen und die erzielbaren Ausbeuten hängen stark von der stofflichen Zusammensetzung der edelmetallhaltigen Komponenten sowie ihrer Anordnung und Zugänglichkeit in den Produkten ab. Ein bedeutender Entwicklungsansatz ergibt sich dementsprechend schon beim Design von Elektronikprodukten oder auch z.B. von Brennstoffzellen mit Blick auf die spätere Rezyklierbarkeit („Design for Disassembly“) (UNEP 2013). Auch infrastrukturell könnte eine Entwicklung hin zu einer besseren Erfassung und Sammlung von Edelmetallhaltigen Abfällen, der Stoffstromsteuerung zu qualitativ hochwertigen Recyclingprozessen, sowie einer effizienteren Vortrennung und der Nutzung von großskaligen Prozessen einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Versorgungssicherheit leisten.

3.7. Eisen / Stahl

3.7.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Gewinnung von Eisen zur Produktion von Stahl ist eng mit der wirtschaftlichen Entwicklung des jeweiligen Landes verbunden. Als Einsatzgebiete sind insbesondere die Bereiche der Bauindustrie, des Maschinen- und Anlagenbaus sowie der Fahrzeugindustrie zu nennen. Im Jahr 2014 wurden weltweit 1,65 Mrd. t Rohstahl produziert, davon entfielen 44 Mio. t auf Deutschland, womit das Land auf dem 7. Platz rangiert. Knapp die Hälfte der Jahresweltproduktion entfiel allein auf China (820 Mio. t), was neben den anderen großen Flächenstaaten, wie Australien, Brasilien, Indien und Russland, zudem als größter Eisenerzförderer am Markt auftritt. Der Anstieg der Stahlproduktion bis 2025 wird aktuell für China mit durchschnittlich 4,3% pro Jahr abgeschätzt. Bei den EU-Staaten liegt die Erwartung des jährlichen Zuwachses bei 1,25%, Deutsch-

land liegt als Wachstumsmotor in Europa bei 1,64% und wird dann 47 Mio. t produzieren.

Es ist zwischen der Roheisen- und der Rohstahlproduktion, aber auch der Wiederverwendung von Eisenschrott (Recycling) zu unterscheiden. Daneben ist der Bereich Edelstahl als Teilgebiet zu nennen, wo weitere Metalle wie Nickel, Chrom und Molybdän, teilweise in sehr großen Mengen benötigt werden. Die Bedeutung ist für ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum sehr hoch.

Eisensulfate, -chloride und -oxide stellen wichtige Verbindungsformen des Eisens dar und finden vielfache Verwendung. Eisen(II)-sulfat ist ein wichtiger Ausgangsstoff zur Herstellung anderer Eisenverbindungen sowie Eisenpigmente (z. B. Berliner Blau). Zudem kommt ein Großteil als Fällungs- und Flockungsmittel in der Abwasseraufbereitung zum Einsatz. Weitere Anwendungen liegen im Bereich von Holzschutzmitteln zum Schutz vor Moos- und Pilzbildung sowie zur Neutralisation alkalischer Böden. Eisen(III)-sulfat wird zur Herstellung von Eisenoxidpigmenten für Farben und Lacke sowie Eisenaunaunen als Beizmittel für Färbungsprozesse eingesetzt. Zudem dient es als Koagulationsmittel bei der Trink- und Abwasseraufbereitung. Eisen(II)-chlorid findet u. a. Anwendung als Reduktionsmittel für Chromat in der Wasserbehandlung. Eisen(III)-chlorid wird aufgrund seines stark sauren

Verhaltens zum Oberflächenätzen von Metallen (Kupfer, Zink), insbesondere bei der Produktion von Leiterplatten, verwendet. In der organischen Synthesechemie kommt es zudem als Chlorierungsmittel sowie Katalysator zum Einsatz. Den mengenmäßig wichtigsten Bereich stellen jedoch die Eisenoxidpigmente, wie Fe_3O_4 (schwarz), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (rot) oder $\alpha\text{-FeOOH}$ (gelb), dar.

3.7.2. Vorkommen

Elementares Eisen kommt in Form von Eisenmeteoriten vor. Auf der Erde liegt es fast ausschließlich in Verbindungen vor und wird aus Erzen gewonnen, die einen möglichst hohen Eisenanteil aufweisen. Das sind insbesondere der Magneteisenstein (Magnetit, Fe_3O_4), der Roteisenstein (Hämatit, Fe_2O_3) und der Spateisenstein (Siderit, FeCO_3). Sie werden vor allem in den großen Flächenstaaten der Welt, z.B. Brasilien, gefördert. Die Weltjahresförderung lag im Jahr 2014 bei 3,22 Mrd. t.

3.7.3. Gewinnungstechnologien

Die Herstellung von (Roh-)Eisen erfolgt im Hochofenprozess, bei dem durch direkte Reduktion im Kontakt mit Kohlenstoff (Steinkohlenkoks) Eisen aus Eisenoxiden bei bis zu 1600 °C freigesetzt wird. Die indirekte Reduktion verläuft über das Boudouard-Gleichgewicht aus der Re-



Eisenschmelze (Foto: DK Recycling und Roheisen GmbH)

aktion von Koks mit CO₂ gebildetem Kohlenmonoxid. Im entstehenden Roheisen lösen sich bis zu 4,3% Kohlenstoff, wodurch der Schmelzpunkt auf etwa 1.150 °C sinkt, so dass es sich flüssig im „Gestell“ sammelt und abgestochen werden kann. Daneben kommt es zur Bildung von Schlacke (250–300 kg pro Tonne Roheisen), die beispielsweise im Straßenbau oder in der Zementindustrie verwendet werden kann. In nachfolgenden Schritten wird durch Senken des Kohlenstoffanteils auf <1% Stahl erzeugt. Dies erfolgt in Deutschland ausschließlich mittels Sauerstoffaufblasverfahren im Konverter. Zum Schmelzen von Schrott, insbesondere auch von hochschmelzenden Edelstählen, dient der Elektrolichtbogenofen. Ca. 70% des in Deutschland hergestellten Stahles wird über die Hochofen-Konverter-Route gewonnen.

Der Hochofenprozess ist seit Jahrzehnten etabliert und wird mit Tagesleistungen von mehr als 10.000 t Roheisen bei einer Nutzungsdauer von mindestens 15 Jahren zuverlässig betrieben. Auch die Überführung des Roheisens in Stahl sowie die Sekundärmetallurgie wurden ständig angepasst. Frühere Verfahren, wie das Siemens-Martin- oder das Thomas-Verfahren, gibt es mittlerweile nicht mehr. Die großen Herausforderungen bestehen vor allem im logistischen Bereich, um die großen Tonnagen für einen kontinuierlichen Betrieb bewältigen zu können.

3.7.4. Recycling

Die Wiederverwertung von Schrott ist ein wesentlicher Teilbereich der Eisen- und Stahlindustrie und wichtig im Blickfeld der Ressourceneffizienz. Das Umschmelzen verbraucht insgesamt viel weniger Energie als die Herstellung von Eisen und Stahl aus Eisenerz. Auch prozesstechnisch ist es relevant, Stahlschrott einzusetzen, indem er beim Konverterprozess als Kühlmittel dient.

Im Jahr 2014 betrug der weltweite Schrottverbrauch 585 Mio. t und damit knapp 1% mehr als im Jahr zuvor. Das entspricht einem Anteil von ca. 35% der Stahlproduktion. Die Tendenz ist jedoch rückläufig, 2007 betrug der Schrotanteil noch 40%. Es gibt dabei starke regionale Unterschiede. So werden beim Hauptstahlproduzenten China lediglich knapp 11% Stahlschrott eingesetzt, in den USA sind es dagegen ca. 70% und in der Türkei sogar 83%. In Deutschland liegt der Schrotanteil bei ca. 44%.

3.7.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird vor allem im logistischen Bereich sowie auf dem Gebiet der Energie-

einsparung (Elektrolichtbogenofen) gesehen. Daneben ist der Bereich Edelstahl von enormer Bedeutung. Hier gilt es, durch eine Variation an Zuschlagelementen kostengünstige Lösungsvorschläge für Spezialanwendungen zu generieren. Im Recyclingsektor bereiten Kupfer-Verunreinigungen in Eisenschrotten Probleme.

Darüber hinaus befindet sich der Stahlmarkt zurzeit in einem Paradigmenwechsel, der sich z. B. durch die immer weiter wachsende Anzahl von hochfesten Stahllegierungen (z. B. AHSS HD-Stähle) oder in Verbindung mit Hybridstrukturen (z. B. LITECOR) sowie Verbundstrukturen (FE mit NE) zeigt. Hinzu kommt noch, dass die Produktionslose kleiner werden und damit auch die Vielfalt von verschiedensten Legierungsbestandteilen in Stählen drastisch zunimmt. Deshalb besteht ein Bedarf großtechnisch legierungsspezifische Stahltreueung durchführen zu können sowie Verbundmetalle und Hybride zu trennen.

3.8. Flussspat

3.8.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Flussspat ist die bergmännische und technische Bezeichnung für das Mineral Fluorit (Calciumfluorid CaF₂).

Flussspat findet Verwendung als Industriemineral (als Flussmittel in der Metallurgie) ebenso wie als anorganischer Rohstoff (Produktion von Flusssäure und anderen Fluorchemikalien). Daneben wird er in der Keramik- und Glasindustrie (z.B. als Trübungsmittel für Glasuren und Emaille) sowie in der Optik (gezüchtete Einkristalle) und als Schmuckstein verwendet.

Flussspat wurde durch die EU unter die kritischen Materialien mit einem Eigenversorgungsanteil < 10% eingeordnet und steht dabei mit Germanium und Indium auf einer Stufe. China dominiert den Weltmarkt bei Flussspat. Die weltweiten Ressourcen an Flussspat werden auf 500 Mio. t geschätzt.

Die wichtigsten Produzenten sind China (2010–2012: 56% der Weltproduktion), Mexiko (18%) und die Mongolei (7%). Die Vorräte sind in Südafrika und Mexiko hingegen deutlich größer als in China und in der Mongolei auf ähnlichem Niveau. Daher besteht vor allem in Südafrika und Mexiko ein beträchtliches Entwicklungspotenzial bei der Flussspatproduktion.

Tabelle 2: Vorräte und Bergbauproduktion von Flussspat (USGS 2015):

	Bergbauproduktion (kt)		Vorräte (kt)
	2013	2014	
USA	k.A.	k.A.	4.000
Bulgarien	60	50	k.A.
China	4.400	4.400	24.000
Deutschland	55	50	k.A.
Iran	70	70	k.A.
Kasachstan	65	65	k.A.
Kenia	49	90	5.000
Mexiko	1.230	1.200	32.000
Mongolei	226	340	22.000
Marokko	76	70	k.A.
Namibia	50	40	k.A.
Russland	80	20	k.A.
Südafrika	175	230	41.000
Spanien	117	107	6.000
Großbritannien	45	45	NA
andere	73	70	110.000
Welt gesamt	6.770	6.850	240.000



Flussspat (Foto: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH)

Die Importe in die EU erfolgten 2012 hauptsächlich aus Mexiko (48%), China (13%) und Südafrika (12%). Das Wachstum des Flussspatbedarfs bis 2020 wird auf jährlich < 3% geschätzt.

Das wichtigste aus Flussspat hergestellte Primärprodukt ist Flusssäure (durch Reaktion mit konzentrierter Schwefelsäure). Diese bildet den Ausgangsstoff fast aller anderer Produkte wie Kryolith (Umsetzung mit Aluminium- und Natrium-Verbindungen nach verschiedenen Verfahren), Alkylierungskatalysatoren für die Treibstoffproduktion und die Erzeugung von fluorierten Kohlenwasserstoffen zur Produktion von Fluorkunststoffen (z.B. PTFE, PFA) und weiteren fluorierten organischen Verbindungen).

Die Produktion von niedermolekularen Fluorchlorkohlenwasserstoffen wurde wegen ihrer Ozonschichtschädlichkeit nahezu eingestellt.

Die Anforderungen der verschiedenen Einsatzzwecke bestimmen auch die zu erzeugenden und gehandelten Flussspatsorten. Man unterscheidet

- » Säurespat mit mindestens 97% CaF_2 zur Produktion von Flusssäure,
- » Keramikspat mit 85–96% CaF_2 für spezielle Gläser, Keramikwerkstoffe und Emaille,
- » Hüttenspat mit 60–85% CaF_2 als Flussmittel in der Eisen- und Stahlherstellung.

3.8.2. Vorkommen

Flussspat kommt weltweit, vor allem in hydrothermal entstandenen Ganglagerstätten, zusammen mit Quarz und Baryt sowie sulfidischen Erzen von Blei, Zink, Kupfer, Zinn, Silber und anderen Metallen vor. Die Gänge müssen dabei abhängig vom Fluoritgehalt gewisse Mindestmächtigkeiten aufweisen. Daneben findet er sich als Verdrängung in Karbonatgesteinen.

Die bekannten Ressourcen an Flussspat betragen weltweit etwa 500 Millionen Tonnen. Große Mengen Fluor sind daneben in den Phosphatlagerstätten als Fluorapatit enthalten. Die Welt-Ressourcen an Phosphaten betragen 67 Mrd. t. Diese entsprechen bei einem geschätzten Anteil von 3,5% Fluor 4,8 Mrd. t Calciumfluorid-Äquivalent.

Im Unterschied zu vielen anderen Rohstoffen wird Flussspat auch in Deutschland gewonnen. Im Schwarzwald und

im Erzgebirge existiert jeweils ein produzierendes Bergwerk. Daneben sind mehrere Bergbauprojekte in Entwicklung.

3.8.3. Gewinnungstechnologien

Roh-Flussspat wird bergmännisch, überwiegend im Untertage-Abbau, abgebaut, wobei sich das konkrete Abbaufahren nach der Lagerstättencharakteristik richtet. Das Roherz wird zerkleinert, wobei der Zerkleinerungsgrad von den Verwachsungsverhältnissen abhängt. Die Aufbereitung erfolgt durch Dichtentrennung mittels Schwertrüben (Vorsortierung) und anschließende mehrstufige Flotation. Hier werden Quarz, Baryt und Sulfide abgetrennt, die ggf. als Nebenprodukte verwertet werden können. Als Sammler werden fettsäurehaltige Reagenzien, wie Olein oder Quebracho, eingesetzt.

Die Herausforderungen bestehen einerseits in der Senkung der Gewinnungs- und Aufbereitungskosten und andererseits in der Verbesserung der Qualität der Produkte (Erhöhung des CaF_2 -Gehaltes, Senkung des Quarz-, Sulfid- und Arsengehaltes).

Lösungsansätze dazu sind neue Verfahren der Vorsortierung (z.B. mittels optischer Sensoren oder Röntgentransmission) und Verbesserungen der Flotation (spezifischere Reagenzien, verbesserte Flotationsmaschinen).

3.8.4. Recycling

Ein End of Life-Recycling von Flussspat erfolgt derzeit nicht. Größere Mengen Fluor werden in Form von Hexafluorokieselsäure (H_2SiF_6) als Nebenprodukt der Herstellung von Phosphatdüngemitteln gewonnen. Diese wird z.B. bei der Kryolith-Produktion eingesetzt.

3.8.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Verbesserung der Aufbereitungsverfahren, in der Entwicklung von Verfahren zum stofflichen Recycling aus fluorhaltigen Abfällen wie Schlacken der Metallurgie oder Keramik sowie der Rückgewinnung des F-Gehalts bzw. fluorhaltiger Kohlenwasserstoffe aus Fluor-Kunststoffen (z.B. PTFE). Darüber hinaus sollten Prozesse zur Gewinnung von CaF_2 und anderen Fluorverbindungen als Nebenprodukt entwickelt werden. Für Letzteres kommen einerseits die Gewinnung des Fluorits aus Zinn- und Wolframlagerstätten und andererseits die Nutzung des Fluorgehaltes von Phosphaten (Apatit) in Frage.

3.9. Gallium

3.9.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Gallium ist ein silber-weißes Metall, welches sich aufgrund seines für ein Metall sehr niedrigen Schmelzpunktes von 30°C leicht verflüssigen lässt. In Form von Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN) spielt Gallium eine wichtige Rolle in der Halbleitertechnik und wird dort zur Herstellung von LEDs, ICs und Solarzellen benötigt.

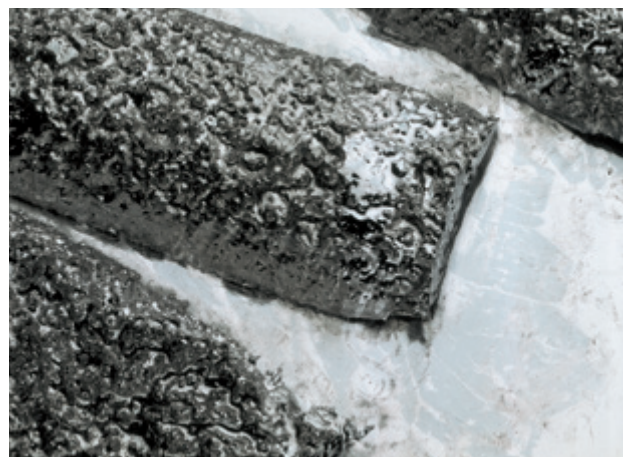
Der weltweite Galliumbedarf ist in den letzten 15 Jahren rasant angestiegen. Diese Tatsache ist vor allem auf das starke Wachstum von Elektrokleingeräten (insbes. Smartphones, Digitalkameras, etc.) zurückzuführen. Besonders China erweitert seine Galliumförderung im großen Maßstab und so hat sich die Förderung von primärem Gallium zwischen 2009 und 2011 mehr als vervierfacht. Aktuelle Prognosen gehen davon aus, dass die weltweite Nachfrage bis zum Jahr 2020 jedes Jahr um weitere 8% ansteigt.

Die steigende Nachfrage hat den Preis von Gallium in den letzten Jahren rasant ansteigen lassen. Ein weiterer Grund für den hohen Preis ist, dass China mit großem Abstand der Hauptproduzent für Gallium ist und hohe Exportsteuern erhebt.

3.9.2. Vorkommen

Gallium ist ein sehr seltenes Element und kommt in der Erdkruste nur als Spurenelement in einer Konzentration von ungefähr 18 ppm vor.

Hauptsächlich wird Gallium als Nebenprodukt bei der Aluminiumherstellung gewonnen, da es in verwertbaren



Gallium (Foto: Umicore AG & Co.KG)

Mengen im Erz von Aluminium, dem Bauxit, enthalten ist (30-80 ppm). Andere Gewinnungsversuche z.B. aus Kohle scheiterten aufgrund mangelnder Effizienz.

3.9.3. Gewinnungstechnologien

Es wird angenommen, dass weltweit noch 760.000 Tonnen Gallium zur Verfügung stehen, davon 21.400 Tonnen in Europa. Die größten europäischen Vorkommen befinden sich in Griechenland und in Ungarn. Gallium wird vor allem aus Bauxit beim Bayer Prozess gewonnen (90%), die restlichen 10% werden bei der Gewinnung von Zink aus Zinkblende erzeugt. Weltweiter Spitzenproduzent in der primären Galliumgewinnung ist China mit 280 Tonnen pro Jahr (2011), dahinter folgt Deutschland mit 40 Tonnen pro Jahr (2011). Der größte Abnehmer von deutschem Primärgallium sind die USA, dort wird es veredelt und wieder in die EU importiert. Das gesamte Fördervolumen von primärem Gallium 2011 betrug 404 Tonnen.

Primäres Gallium hat eine Reinheit von 99,99%. Für die Halbleiterproduktion ist aber eine deutlich höhere Reinheit des Galliums nötig, so dass es in Ländern wie Japan oder den Vereinigten Staaten weiter raffiniert wird. Daher zählt die EU als Nettoexporteur von Gallium.

Aufgrund der niedrigen Konzentration im Bauxit betreiben nur relativ wenige Aluminiumproduzenten eine effiziente Galliumgewinnung.

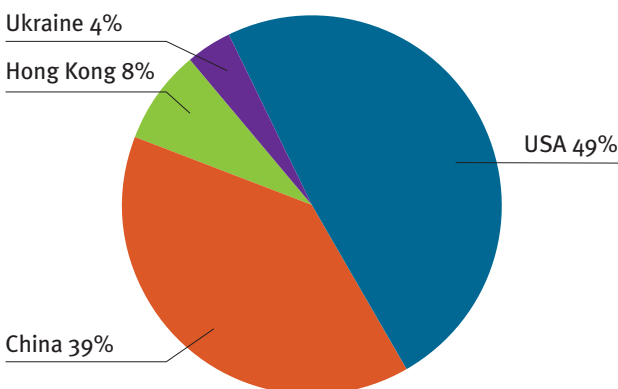
3.9.4. Recycling

Für die Rohstoffversorgung spielt das Recycling von hochreinem Gallium eine wichtige Rolle; es macht heute bereits ca. 50% der Galliumproduktion aus. Derzeitig findet allerdings nur das Recycling der Produktionsrückstände statt. Ein Recycling im Sekundärrohstoffmarkt ist so gut wie nicht vorhanden. Allerdings ruht hier ein großes Potential zur Rückgewinnung von Gallium, wenn es gelingt, einen Recyclingprozess für galliumhaltige Produkte (wie LED's, Solarzellen oder Elektrokleingeräte) zu etablieren. Das Recycling der Produktionsrückstände beinhaltet vier wesentliche Prozessschritte: eine saure oder alkalische Aufbereitung der Lösung, eine Elektrolyse und eine Fällungsreaktion sowie eine Aufreinigung durch Kristallisation.

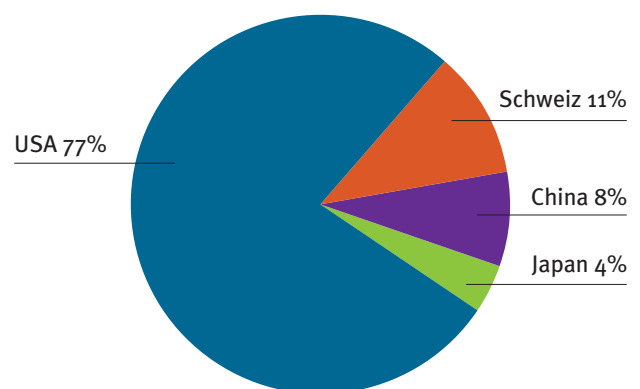
3.9.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Aufgrund der weiter stark steigenden Nachfrage sind neue Technologien zur Ausweitung der bisherigen Galliumproduktion erforderlich. Insbesondere werden Verfahrensentwicklungen benötigt, welche die Gewinnung von Gallium als Nebenprodukt der Aluminium- und/oder Zinkgewinnung noch effektiver machen. Elementar für die Zukunft ist weiterhin eine Verbesserung des EOL-Recyclingkreislaufs, da bis heute eine Aufarbeitung und Rückgewinnung aus galliumhaltigen Endprodukten (z.B. Smartphones) kaum stattfindet.

EU-Importe von unbehandeltem und pulverisiertem Gallium (30,4 t)



EU-Exporte von unbehandeltem und pulverisiertem Gallium (40,7 t)



(Quelle: Eurostat Comext Database CN 8112 9289, Zugriff Juli 2013)

3.10. Germanium

3.10.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Hinsichtlich der ökonomischen Bedeutung als auch des Versorgungsrisikos werden sowohl Germanium als auch Indium als kritische Elemente eingeschätzt. Das Versorgungsrisiko für diese beiden Elemente ergibt sich unter anderem aus der Tatsache, dass die weltweite Produktion zu großen Teilen durch China abgedeckt wird. China generierte 2013 ca. 60% der Weltproduktion an Germanium, beschloss aber im Jahr 2014 Exportlimitierungen für Germanium. Die EU ist in großem Maß von diesen Importen abhängig, da im EU Wirtschaftsraum selbst keine verwertbaren Erzlagerstätten vorhanden sind. Weitere Faktoren, die die Kritikalität erhöhen, sind die in vielen Fällen geringen Recyclingraten, sowie die meist geringe Ersetzbarkeit durch andere, weniger kritische Elemente. (EU-Report, 2010, 2014)

Die ökonomische Bedeutung der kritischen Elemente wird vor allem durch neue, aufstrebende Technologiezweige bestimmt. Ausgehend von einer Produktionsmenge von 150 t Germanium/Jahr für 2013 (PR Newswire 22/10/2014) wird für 2030 ein Bedarf von 220 t/Jahr prognostiziert. Der größte Bedarf für Germanium ergibt sich v.a. aus den Industriezweigen zur Herstellung von Glasfaserkabeln, sowie von Produkten für die IR-Optik. (EU-Report, 2010).

3.10.2. Vorkommen

Germanium kommt in der Erdkruste mit einer Konzentration von etwa 1,5 ppm vor und ist damit ökonomisch bisher nicht abbauwürdig. Infolge der chemischen Ähnlichkeit zwischen Germanium und Silicium (beide befinden sich in der 4. Hauptgruppe) ist das geochemische Verhalten der anorganischen Spezies sehr ähnlich. Beide Elemente weisen ähnliche Ionenradien auf, wobei Silicium durch Germanium im oxidischen Kristallgitter ersetzt wird. Aus diesem Grund ist der Hauptteil des Germanium in Form silikatischer Strukturen in der Erdkruste feinverteilt. Erhöhte Konzentrationen sind in einzelnen sulfidischen Mineralien der Zink-, Blei- oder Kupfererze zu finden. Der Abbau dieser konzentriert sich auf Weltkonzerne aus China, USA und Russland, womit bei steigender Nachfrage ein zunehmender Versorgungsdruck für Europa entsteht. Zusätzlich sind auch im europäischen Raum sowohl in Braun- als auch Steinkohlelagerstätten Germanium-haltige Bereiche zu finden, die durch Verwitterungsprozesse pflanzlicher Biomassen oder Germanium-Adsorptionen aus angrenzenden Bodenwässern entstanden sind. Verschiedene or-

ganische Germanium-Verbindungen, zum Beispiel aus der Biomethylierung von Mikroorganismen, sind ebenfalls in ozeanischen Gewässern entdeckt worden, spielen aber für die industrielle Germanium-Gewinnung keine Rolle.

3.10.3. Gewinnungstechnologien

Die mineralische Gewinnung von Germanium ist durch die weltführenden Produzenten patentrechtlich geschützt und gibt wenig Einblicke in die exakte Prozessdurchführung. Selbst bei den Großproduzenten wird Germanium nicht als Hauptrohstoff abgebaut, sondern fällt bei der Restaufbereitung von Germanium angereicherten Aschen oder Schlacken als weiterer Wertstoff an. Die Gewinnung kann sowohl aus der pyrometallurgischen (Ausnutzung der Flüchtigkeit von GeO und GeS), als auch aus der hydrometallurgischen Erzaufbereitung heraus durchgeführt werden. Reststoffe werden dabei gelaugt. Anschließend wird die Germanium reiche Lösung klassisch mit organischen Komplexbildnern oder durch Einleitung von H₂S gefällt. Die erhaltenen Feststoffe werden thermisch verbrannt, um eine Konzentrierung an Germanium zu erreichen. Heutzutage wird für die großtechnische Aufbereitung die Flüssig/Flüssig-Extraktion bevorzugt, welche höhere Selektivitäten und geringere Prozesskosten ermöglicht. In den verfügbaren Patentschriften werden dabei zahlreiche Oxime, Chinone, Phosphonsäuren oder auch Amine als geeignet deklariert. Weitere Forschungsansätze beschäftigten sich mit Ionentauschern oder auch der Ionen-Flotation zur Germaniumkonzentrierung, deren großtechnische Anwendung jedoch nur an ausgewählten Beispielen gezeigt werden konnte. Eine Feinaufreinigung von Germanium erfolgt großtechnisch über die salzsaure Chloriddestillation, um durch anschließende Hydrolyse GeO₂ als weißen Niederschlag abzutrennen. GeO₂ kann dann durch Hydrierung mit H₂ in Germanium reduziert werden. Gerade in der Halbleiterindustrie sind sehr hohe Reinheitsgrade von Germanium erforderlich, die durch weiteres Zonenschmelzen aus dem Rohprodukt realisiert werden können.

3.10.4. Recycling

Weltweit werden etwa 30% des Germaniumverbrauchs durch Recycling gedeckt. Im Zuge der Herstellung optischer Geräte werden >60% des Produktionsabfalls als Neuschrott wiederverwertet. Ferner wird Germanium aus ausgemusterten Militärfahrzeugen zurückgewonnen.

3.10.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Da der Germaniumabbau aus Erzen immer an das Hauptzielmetall gekoppelt ist, richtet sich die Jahresproduktion aus den Lagerstätten immer nach der Marktlage des Hauptelementes und kann bei Bedarf nicht beliebig erhöht werden. Um das Versorgungsrisiko dennoch zu verringern, müssen alternative, möglichst einheimische Rohstoffquellen erschlossen werden. Aktuelle Forschungen im Bereich des Phytomining untersuchen das Potenzial, Germanium in Pflanzen zu akkumulieren, um auch Teile der Erdkruste zur Rohstoffgewinnung nutzen zu können. Dabei stehen Böden von Bergbautailings oder Altlasten des Kohleabbaus im Fokus. Zusätzliche Möglichkeiten der modernen Analytik im Spurenbereich bieten ebenfalls zusätzliche Chancen, Germanium in Bereichen der Natur oder in Altgeräten der heutigen Spitzentechnologien zu lokalisieren und mit geschickten Prozesskombinationen wieder zu gewinnen.

3.11. Graphit

3.11.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Graphit wird vorwiegend in der Feuerfestindustrie zur Herstellung von Schmelzriegeln und Ofenausmauerungen eingesetzt. Als Grundstoff für die Zukunftstechnologien findet es Anwendung als Elektrodenmaterial in Batterien und in Kohlebürsten. Graphite mit hohen Stampfdichten sind weit verbreitet in der Pulvermetallurgie. Graphitdispersionen werden vor allem zum Besprühen und Tauchen von Schmiedeteilen benutzt. Speziell in Europa wachsen die Anwendungsfelder der Gebäudeisolierung und des Brandschutzes. Zudem ist Graphit ein sehr gutes Festschmiermittel und wird

eingesetzt, wenn kein Schmieröl aufgrund von Verharzung eingesetzt werden kann.

Die weltweite Graphitproduktion betrug 2012 1,2 Mio. t und ist über die letzten Jahre konstant. Die Vorräte werden auf 130 Mio. t geschätzt und gewähren eine stabile Versorgung für die nächsten 100 Jahre. Mit einem Marktanteil >67% ist China der Hauptproduzent von Graphit, gefolgt von Indien (11%) und Brasilien (7%).

3.11.2. Vorkommen

Bei natürlichem Graphit unterscheidet man zwischen makrokristallinem (auch als Flockengraphit bekannt) und mikrokristallinem (amorpher) Graphit. Eine seltene Sonderform des makrokristallinen Graphits ist der Vein/Lump-Graphit.

Naturgraphit kommt weltweit in Form von Flocken und feinverteilten Partikeln vor. Sowohl der Kohlenstoffgehalt der Erze, als auch die Größe der Partikel schwankt je nach Lagerstätte und ist vom Ausgangsgehalt und Metamorphosegrad abhängig.

Die hohe wirtschaftliche Bedeutung von Graphit resultiert aus den herausragenden Eigenschaften:

- » Elektrische/ thermische Leitfähigkeit
- » Chemische Beständigkeit
- » Interkalierbarkeit
- » Geringe Wärmeausdehnungskoeffizienten
- » Schmierfähigkeit
- » Schwarze Farbe
- » Weltweite Verfügbarkeit
- » Vergleichsweise geringe Beschaffungskosten

3.11.3. Gewinnungstechnologien

Flockengraphit wird standardmäßig im Tagebau gewonnen. Durch Bohr- und Sprengarbeit wird das Festgestein gelöst, anschließend gebrochen und gemahlen. In besonders gehaltvollen Erzlagerstätten mit einem Graphitanteil >20%, wird Graphit auch industriell im Tiefbau gewonnen. Aufgrund der hydrophoben Eigenschaft des Graphits ist die mehrstufige Flotation die gängigste Aufbereitungsmethode. Dabei werden Anreicherungen von 80–98%, bei möglichst geringer Zerstörung der



Graphit (Foto: Graphit Kropfmühl GmbH)

Flockengröße und Form erreicht. Anschließend erfolgt eine Entwässerung und Trocknung. Das anfallende Konzentrat kann nach einer Absiebung verkauft werden. Bedarf die geplante Verwendung höherer Reinheit, so wird dies durch chemische und chemisch-thermische Aufschlüsse erreicht. Die maximale Reinheit beträgt 99,9999%. Weitere anwendungsabhängige Parameter wie Oberflächengrößen und Kornformen können durch eine entsprechende Vermahlung erzielt werden. Durch Interkalierung können Blähgraphite mit bis zur 200-fachen Volumenzunahme hergestellt werden.

3.11.4. Recycling

Feuerfeste Ziegel und Ofenauskleidungen für die Gießertechnik sowie graphitbasierte Dämmstoffe werden bereits seit einigen Jahren recycelt. Dabei werden auch Aluminiumoxid-Graphit- sowie Magnesiumoxid-Graphit-Composite wiederverwertet. Der Markt für Recyclinggraphit wächst stetig, Haupteinsatzgebiet für Recyclinggraphit sind Bremsbeläge und Dämmstoffe. Die Rückgewinnung hochwertigen Lamellengraphits aus der Stahlerzeugung ist technisch machbar, wird gegenwärtig aber nicht durchgeführt. Grund ist die weltweit ausreichende Verfügbarkeit an Graphit, was sich generell auf Entwicklungen zum Graphitrecycling auswirkt. Daten zum weltweiten Graphitrecycling sind nicht verfügbar.

3.11.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Je nach Vorbehandlung und Aufarbeitung des Graphits können einzelne der o.g. Eigenschaften im Anwendungssystem besonders stark zur Geltung gebracht werden. Neben der Erzeugung von für die jeweilige Anwendungsmaßgeschneiderten Graphiten ist auch die nachfolgende Verfahrenstechnik zur Einbringung der Graphite in das Wirtssystem, z.B. Füllstoff in Kompositen, von entscheidender Bedeutung.

Derzeitig fokussiert sich die Forschung und Entwicklung auf die Bereiche Graphen, Batteriegraphit, Blähgraphit/Flammschutzsysteme sowie Kompositensysteme. Hierfür wird Graphit zur Erhöhung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie zur Verstärkung der mechanischen Eigenschaften eingesetzt.

3.12. Indium

3.12.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die wirtschaftliche Ausgangssituation für Indium ist der des Germaniums sehr ähnlich.

Mehr als 81% des von der EU importierten Indiums stammt aus China. Die Recyclingmöglichkeiten sind begrenzt und beschränken sich auf Produktionsrückstände (EU-Report, 2010).

Ausgehend von einer Produktionsmenge von 581 t Indium/Jahr für 2006 wird für 2030 ein Bedarf von 1911 t/Jahr prognostiziert. Der Bedarf für Indium kommt v.a. aus den Industriezweigen zur Herstellung von Displays und Dünnschichtphotovoltaik. (EU-Report, 2010).

3.12.2. Vorkommen

Ebenso wie Germanium kommt Indium als reines Element nicht in der Natur vor. Auch Indiumminerale sind selten in natürlichen Systemen zu finden. Bei Indium handelt es sich ebenfalls um ein chalcophiles Element, weshalb es vor allem in Zinkblende angereichert ist, weiterhin in Sulfiden von Kupfer, Eisen und Zinn. In der Erdkruste kommt es mit einer Konzentration von 0,1 ppm vor. Auch Indium ersetzt Elemente in Metallsulfiden, die einen ähnlichen Ionenradius aufweisen. Insbesondere die Elemente, die eine tetraedrische Koordination aufweisen. Hohe Indiumkonzentrationen kommen in Sphalerit, Chalcopyrit (CuFeS_2), Stannit ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) und Kassiterit (SnO_2) vor. Diese gehen zudem oft mit erhöhten Kupferkonzentrationen einher. Weiterhin besteht die Hypothese, dass die Indiumlöslichkeit durch die Anwesenheit von Mangan erschwert wird.

3.12.3. Gewinnungstechnologien

Der überwiegende Anteil der weltweiten Germanium- und Indium-Produktion wird durch China realisiert. Aus diesem Grund sowie ihrer strategischen Bedeutung sind in der Literatur keine detaillierten und aktuellen Angaben zum Produktionsprozess von Indium und Germanium zu finden. Nachfolgend sind die in der Literatur aufgeführten Herstellungsschritte zusammengefasst.

Indium wird aus Zink-, Blei-, und Zinn-Verbindungen gewonnen. Es reichert sich während des Schmelzprozesses zur Gewinnung der jeweiligen Hauptmetalle in den entstehenden Nebenprodukten wie im Rückstand, in der Flug-

asche, der Schlacke und in den metallischen Zwischenprodukten an. Die Produktion von Indium ist ein komplexer extraktiver Prozess mit geringer Extraktionseffizienz.

Länder wie Italien, Frankreich und Belgien, die nicht über heimische Ressourcen verfügen, beziehen Rückstände, Flugstäube und Schlacken aus der Blei/Zink-Produktion und gewinnen Indium durch Extraktion. Laut verfügbaren Literaturquellen wird Indium in 30 Anlagen, verteilt in 18 Ländern gewonnen. Die Gewinnung geschieht zum einen als Nebenprodukt der primären Metallproduktion, zum anderen durch Recycling indiumführender Produkte. Indium wird auch durch das Recycling von Zink-, Blei-, und Zinn-Verbindungen gewonnen. Die Gewinnung von Indium durch Recycling von Zink-Verbindungen wird nach dem Prozess der Anaconda Copper Mining Company aus gerösteter Zinkblende oder Zinkoxid-Dampf realisiert. Beim Recycling von Zinn-Verbindungen wird Indium aus einer Zinn-Indium-Chlorid-Schlacke gewonnen. Bei der Gewinnung von Indium durch Recycling von Blei-Verbindungen wird der Rückstand aus der Metallgewinnung einer Blei-Schmelze zugeführt. Hier reichert sich Indium in den Blei-Barren und auch in der Hochofenschlacke an.

3.12.4. Recycling

Das Recycling von Indium fokussiert schwerpunktmäßig auf die ITO-Herstellungs- und Produktschiene. Sowohl die Sputterrückstände (Targets) aus der Dünnschichttechnologie, als auch die ausgesonderten Displayeinheiten werden an einigen Standorten aufbereitet. Das Recyclingpotential ist extrem hoch, obwohl z.B. die Massenanteile pro Display üblicherweise zwischen ca. 460 und 860 mg pro m² LCD Display liegen. Es sind nur wenige belastbare Datensätze bezüglich der Quantifizierung der Sekundär-Indium-Produktion verfügbar. Maßgebliche Mengen werden vor allem in Japan, Korea und China umgesetzt. So wird bei Asahi Pretec (Japan) eine Produktionskapazität von ca. 200 Jahrestonnen an Sekundär-Indium in seiner Target-Recycling-Anlage in Fukuoka genannt. Für Europa nennt Umicore eine Kapazität von ca. 50 Jahrestonnen aus ihrem Special-Metals-Refinery-Process.

3.12.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Ähnlich wie bei der Germaniumproduktion ist der Indiumabbau an den Abbau des entsprechenden Hauptzielmetalls gekoppelt und folglich gelten vergleichbare Voraussetzungen und Konsequenzen. Das Erschließen alternativer Rohstoffquellen stellt somit einen Hauptansatzpunkt für die Sicherung der Rohstoffbasis dar. Aktu-

elle Forschungsprojekte zielen auf die Gewinnung mittels mikrobiologischer Laugungsprozesse, welche z.B. im Bereich der Kupferproduktion bereits großflächig angewendet werden. Aktuell existieren die Ansätze zur Laugung alter Wertstoffhalden (Heaps, Tailings) oder des direkten In-Situ-Leaching in der ungestörten Gesteinsmatrix.

3.13. Kalisalz

3.13.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Weltbevölkerung wächst stetig und dies bei einer schrumpfenden Ackerfläche – weltweit ist somit eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Erzeugung von Pflanzenprodukten notwendig, um die Menschheit zu ernähren. Hierbei spielen Fragen der Düngung eine zentrale Rolle.

Kalium ist essentiell für das Pflanzenwachstum und muss dem Boden kontinuierlich zugeführt werden, um eine nachhaltige Landwirtschaft zu betreiben. Kalidünger wird überwiegend aus Kalirohsalzen, die bergmännisch gewonnen werden, hergestellt. Mehr als 90% des weltweit verbrauchten Kalidüngers ist Kaliumchlorid. Außerdem werden Kaliumsulfat, Kaliummagnesiumsulfat und Kaliumnitrat als Dünger eingesetzt, vor allem zur Düngung chloridunverträglicher Kulturen wie z.B. Kartoffeln, Spinat oder Gurken.

Die Gesamtmenge an 2014 produzierten Kalidüngemitteln wird auf 31,6 Mio. t K₂O geschätzt (Quelle: FAO).

Neben der Verwendung in der Landwirtschaft werden Kalisalze auch in der chemischen Industrie eingesetzt, z.B. als Ausgangsprodukt zur Herstellung von Kaliumhydroxid durch Elektrolyse.

Auch in der Lebensmittel- und in der Pharmaindustrie gibt es wichtige Anwendungsgebiete für Kalisalze, z.B. als Bestandteil von Infusionslösungen.

3.13.2. Vorkommen

Kalisalze kommen in zahlreichen Lagerstätten in vielen Teilen der Welt vor. Die weitaus größten befinden sich in Kanada (Saskatchewan), Russland und Weißrussland.

In Europa gibt es größere abbauwürdige Vorkommen in Deutschland, Spanien, und Großbritannien. Die beiden wichtigsten Lagerstätten Deutschlands sind das Werra-Fulda-Gebiet und das Gebiet Hannover/Magdeburg (Tabelle 3):

Tabelle 3: Abbauwürdige Kalisalzreserven in ausgewählten Ländern in Mio. t K₂O (2014)

Welt	3.500
Kanada	1.100
Weißrussland	750
Russland	600
China	210
USA	200
Deutschland	150
UK	70

Gemessen an der Förderung von 2014 (Tabelle 4) ist von einer statischen Reichweite > 450 Jahren auszugehen.

Tabelle 4: Förderung von Kalisalzen in ausgewählten Ländern in Mio. t K₂O (2014)

Kanada	9,8
Russland	6,2
China	4,4
Weißrussland	4,3
Deutschland	3,0
USA	0,9
UK	0,5

Die Salzlager beinhalten Salzgemische, welche vor allem aus folgenden Mineralien bestehen:

- » Halit (NaCl)
- » Sylvin (KCl)
- » Carnallit (KMgCl₃ · 6 H₂O)
- » Kieserit (MgSO₄ · H₂O)
- » Kainit (KCl · MgSO₄ · 3 H₂O)
- » Anhydrit (CaSO₄)

In den deutschen Lagerstätten im Werra-Fulda-Gebiet finden sich „Hartsalze“ (Gemenge von Halit, Sylvin und Kieserit) mit Carnallit-Anteilen.

3.13.3. Gewinnungstechnologien

Kalisalze werden meist durch Schachtbau, aber auch durch Aussolverfahren (Solution Mining) und direkt aus Salzseen (Solarevaporation) gewonnen.

Festes Kali-Rohsalz aus dem klassischen Schachtbau wird nach der bergmännischen Gewinnung je nach Verwachsungsgrad mehr oder weniger stark aufgemahlen. Die Aufbereitung von Kaliumchlorid erfolgt vorwiegend nach drei Verfahren:

- » Heißlöseverfahren & Eindampf- und Kristallisationsverfahren
- » Flotation
- » Elektrostatische Aufbereitung (ESTA-Verfahren)

Die jeweilige Verfahrensführung hängt im Wesentlichen von der Art des Salzgemisches sowie der Verbringung der Nebenprodukte ab. Das gewonnene Kaliumchlorid (Reinheit: >95% KCl) wird für den Einsatz als Düngemittel bzw. für Düngermischungen zumeist granuliert oder kompaktiert.

Das für die chemische Industrie in höherer Reinheit von >99% KCl gewonnene Kaliumchlorid stammt aus Eindampfanlagen.

Kaliumsulfat wird großtechnisch über das Mannheim-Verfahren mittels Umsetzung von Kaliumchlorid mit Schwefelsäure hergestellt. Als Koppelprodukt fällt Salzsäure an, die vermarktet oder weiterverarbeitet werden muss.

Ein alternatives Verfahren zur Herstellung von Kaliumsulfat – welches insbesondere in Deutschland Anwendung findet – ist die doppelte Umsetzung von KCl mit MgSO₄ zu K₂SO₄. Nach diesem Verfahren werden weltweit über 1 Mio. t K₂O/a Kaliumsulfat produziert.

Die Herstellung von Kaliumnitrat erfolgt großtechnisch überwiegend nach drei unterschiedlichen Verfahren:

- a) Israel und Jordanien:
KCl + HNO₃ · KNO₃ + HCl
- b) Chile („Caliche“, NaNO₃-haltiges Gestein):
NaNO₃ + KCl · KNO₃ + NaCl
- c) China (zwei vermarktungsfähige Produkte):
NH₄NO₃ + KCl · KNO₃ + NH₄Cl

3.13.4. Recycling

Ein Recycling kaliumhaltiger Düngemittel *per se* ist nicht möglich, da Düngemittel gemeinhin in den Boden eingebracht werden. Es gibt Überlegungen, Kalium aus Gär-

resten von Biogasanlagen wiederzugewinnen. Die dafür benötigte Technologie steht gegenwärtig nicht zur Verfügung. Damit ist mittelfristig nicht von einem substantiellen Beitrag zum Kaliumrecycling auszugehen.

3.13.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Weltweit steht im Vordergrund der Forschung die Düngemittelleffizienz und damit auch die Optimierung der Kalidüngung, um die Primärpflanzenproduktion und -qualität zu erhöhen.

Da Kalisalze aus natürlichen Quellen (Lagerstätten, Salzseen) mit jeweils unterschiedlichen Zusammensetzungen unter regionalen Bedingungen gewonnen werden, ist für jede Produktion eine standortsspezifische Verfahrensweise zu finden. Es gibt zur Zeit zahlreiche Projekte zur Errichtung neuer Kali-Produktionsstätten – für die jeweils mittels F&E-Anstrengungen ein solches spezifisches Verfahren ausgearbeitet werden muss.

Bei der Aufbereitung der Kali-Rohsalze fallen weltweit feste und flüssige Rückstände an, die entsorgt werden müssen. Ein Forschungsschwerpunkt – insbesondere in der deutschen Kaliindustrie – ist die Reduzierung dieser Rückstände.

3.14. Kobalt

3.14.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Kobalt gehört als Übergangsmetall der 9. Gruppe zu den Elementen mit den vielfältigsten Anwendungen. Kobalt ist ein strategisch wichtiges Metall. Es ist ferromagnetisch mit einer Curietemperatur von 1.150 °C. Es tritt unterhalb von 400 °C in hexagonal-dichtester Kugelpackung als α -Kobalt und oberhalb von 400 °C in kubisch flächenzentrierter Form als β -Kobalt auf. Kobalt hat einen hohen Schmelzpunkt ($m_p = 1.493$ °C). Charakteristisch für Kobalt ist, dass es bis zu sehr hohen Temperaturen seine Festigkeit behält. Kobalt ist multivalent. Ausgehend von der Verwendung von Kobaltverbindungen als hitzefeste Farbe bzw. Farbpigmente zur Färbung von Keramiken und Gläsern hat dieses Element seine außergewöhnliche Bedeutung als zentrales Element von Vitamin B₁₂, als Legierungsbestandteil für die Erhöhung der Warm- und Verschleißfestigkeit legierter Stähle, als Binder in Hartmetallsinterwerkstoffen und Diamantwerkzeugen, als Katalysator, in der Landwirtschaft und Medizin, in der elektromagnetischen Datenspeicherung und in jüngerer

Zeit als Elektrodenmaterial in Li-Ionen-Akkus erlangt. Der Weltverbrauch ist von 2007 bis 2013 um etwa 60% gestiegen. Er betrug 2013 etwa 71.000 t. 2014 betrug der Bedarf etwa bereits 91.000 t. Diese Steigerung ist technisch zu einem erheblichen Teil auf die Verwendung als Elektrodenmaterial und wirtschaftlich auf den enormen Bedarf in China zurückzuführen. Dieser Mehrverbrauch konnte aber zu einem wesentlichen Teil durch neue Anbieter kompensiert werden. Circa 60% des Kobalt werden in der chemischen Industrie benötigt und 40% in der Metallurgie. Kobalt ist Technologie- und Innovationstreiber und in der EU als kritisches Metall eingestuft. Diese Entwicklung wird auch dadurch unterstrichen, dass Kobalt seit 2010 an der London Metal Exchange (LME) gehandelt wird, und der Handelspreis seit 2013 nicht zuletzt durch den „Tesla-Effekt“ ein stabiles Niveau halten konnte. Allerdings darf diese relativ preisstabile Phase nicht über erhebliche Schwankungen in der Vergangenheit hinwegtäuschen. 1982 haben sich mehrere Produzenten, Händler und Verbraucher zum Kobalt Development Institut (CDI) zusammengeschlossen, einer Nonprofitorganisation, der derzeit 44 Mitglieder aus 18 Ländern angehören. Das CDI repräsentiert etwa 45% des weltweit erzeugten Kobalt.

3.14.2. Vorkommen

Kobalterze sind vorwiegend mit Nickel- und Kupfererzen vergesellschaftet. Es gibt zwar in Europa Kobalterzlagertstätten, welche von historischer Bedeutung waren, sie sind aber für die Marktversorgung nicht relevant. Die Versorgung beruht nach wie vor zum Großteil auf Intermediaten der Erze des afrikanischen Kupfergürtels (etwa 50%). Durch die zunehmende Verschiebung der Rohstoffversorgung zur Verarbeitung nickelhaltiger Erze wird versucht, diese ausgeprägte Versorgungsabhängigkeit zu vermindern. Die größten Verarbeiter von Kobalterzen/Intermediaten (2013) sind China mit einem Anteil von 42% und Finnland mit 12%.

3.14.3. Gewinnungstechnologien

Entsprechend seiner Stellung im Periodensystem der Elemente, den ähnlichen chemischen Eigenschaften zu Nickel und der vorwiegenden Vergesellschaftung von Kobalt-, Nickel- und Kupfererzen erfordert die Isolierung von Kobalt aufwändige Raffinationsschritte. Nach der Trennung vom Taubanteil beginnt die Gewinnung kobalthaltiger Erze abhängig davon, ob arsenidische Erze, Sulfarsenide, Sulfide oder Oxide verarbeitet werden, üblicherweise mit einer Anreicherung durch Schwerkraftsedimentation und/oder Flotation. Die weitere Verhüttung erfolgt durch

vorwiegend pyro- und hydrometallurgische Prozesse, die auf die Pionierarbeiten der Kobalt/Nickel-Raffination, vor allem den Sherritt Gordon Prozess, den Union Minere Prozess, den Nikkelwerke Prozess oder den Outokumpu Prozess aufbauen. Dabei wird das Kobalt schließlich als Salz oder Oxid vermarktet, oder auch durch chemische Reduktion als Kobaltpulver oder kathodisch abgeschieden. Den hohen technologischen Anforderungen an die Kobaltraffination kann vor allem die Solventextraktion durch die Selektivität der alkylsubstituierten Phosphorsäure (zum Beispiel DEHPA) in der Vorraffination, der alkylsubstituierten Phosphonsäure (zum Beispiel mono(2-ethylhexyl)2-ethylhexylphosphonat PC-88A oder P507) und der alkylsubstituierten Phosphinsäure (zum Beispiel Bis 2,4,4-Trimethylpentylphosphinsäure Cyanex 272 bzw. Ionquest 290) sowie der Ketoxime (zum Beispiel LIX 84 zur selektiven Kupfer/Kobalt-Trennung) entsprechen.

3.14.4. Recycling

Die ausgeprägte Abhängigkeit des europäischen Marktes von Importen hat zu verschiedenen Recyclingverfahren geführt, die an die Anforderungen an verschiedene Kobaltprodukte angepasst sind. Im Prinzip sind Recyclingverfahren den Gewinnungsverfahren ähnlich, müssen aber die anwendungsspezifische Matrix und Kontamination berücksichtigen. Neben pyrometallurgischen Aufschlüssen (zum Beispiel in der Katalysatoraufarbeitung) können hydrometallurgische Verfahren mit großer Selektivität auf Verbundwerkstoffe (zum Beispiel Kobalt als Bindemittel für Wolframcarbid oder Diamant) abgestimmt werden.

3.14.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Je komplexer die Matrix kobalthaltiger Güter ist, desto aufwändiger gestaltet sich auch das Recycling. Li-Ionen-Akkus sind durch das Zusammenwirken wasserfreier Elektrolyte, verschiedener Ableitelektroden und unterschiedlicher Kathodenmaterialien durch die stetig steigenden Produktionsraten eine enorme, noch immer nicht befriedigend gelöste Herausforderung an das Recycling, obwohl das Problem schon intensiv beforscht worden ist. Insbesondere muss nachhaltiges Recycling auch die Rückgewinnung von Lithium berücksichtigen, was die Anwendung pyrometallurgischer Verfahren einschränkt.

3.15. Kokskohle

3.15.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Pyrolyse von Braun- und Steinkohlen gehört zu den ältesten Kohleveredlungsverfahren. Sie beschreibt dabei ein thermochemisches Verfahren, bei dem unter Sauerstoffabschluss ein Koks unter Freisetzung von Gas- und Flüssigprodukten (sog. flüchtige Bestandteile) entsteht. Von wirtschaftlicher Bedeutung ist heute insbesondere die Herstellung von Stückkoks aus Steinkohle für die Metallurgie. Die hergestellten Stückkokse dienen z. B. als Energielieferant, Reduktions- und Aufkohlungsmittel im Hochofenprozess aber auch als Reaktant bei der Herstellung von Calciumcarbid.

3.15.2. Vorkommen

Zur Herstellung fester Stückkokse eignen sich vornehmlich Gas- und Fettkohlen (Kokskohlen). Sie zählen zu den Hartkohlen und weisen neben dem im Prozess der Inkohlung reduzierten Wassergehalt ebenso einen niedrigen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen von durchschnittlich 28% auf.

Weltweit wurden im Jahr 2013 1,2 Mrd. t Steinkohle für die Stahlerzeugung eingesetzt. Die höchsten Förderraten der Kokskohle weisen China (527 Mio. t), Australien (158 Mio. t) und die USA (78 Mio. t) auf. In den letzten Jahren entwickelte sich China vom reinen Nettoimporteur zum Hauptexporteur von Koks noch vor Australien und den USA. Die Steinkohlekoksproduktion im Jahr 2013 belief sich auf 685 Mio. t. Da Kokskohlen einen kaum substituierbaren Grundstoff darstellen, der auf Grund der wenigen Förderländer einem hohen Lieferisiko unterliegt, führt die EU-Kommission Kokskohlen auf der Liste der kritischen Rohstoffe. Dem kann durch die Erweiterung der Rohstoffbasis, z. B. um so genannte nichtbackende Kohlen, entgegengewirkt werden. Diese zeichnen sich durch eine hohe Verfügbarkeit aus, erfordern aber eine intensivere Aufbereitung und Veredlung, um diese für die Anwendung nutzbar zu machen.

3.15.3. Gewinnungstechnologien

Derzeit werden in Deutschland in fünf Kokereien Stückkokse aus Steinkohlen hergestellt. Zentraler Bestandteil der Kokerei ist der Koksofen. Er ist in der Regel als Horizontalkammerofen ausgeführt. Mehrere Ofenkammern werden in einer Ofenbatterie zusammengefasst. Die Beheizung der Ofenkammern erfolgt über Heizzüge zwi-

schen den Ofenkammern. Diese Kammern sind mit Feuerfeststeinen ausgekleidet. Die Ofenkammer wird über die Öffnung in der Ofendecke befüllt. Die Verkokung findet nach einem vorgegebenen Aufheizregime statt. Durch das Aufbrechen der schwachen Bindungen in der Kohle kann es zum Erweichen der Feststoffsubstanz kommen. Durch das Verschmelzen der feingemahlene Kohle und das Entweichen der flüchtigen Bestandteile aus der Kohle entsteht ein Schmelzkoks, der sich mit fortschreitender Temperaturerhöhung im Verkokungsprozess wiederverfestigt. Ist der Koks „ausgegart“, wird er horizontal aus dem Ofen ausgebracht, gelöscht und abgekühlt. Die Kokslöschung kann sowohl nass (mit Wasser) als auch trocken (mit Inertgas) erfolgen.

Das bei der Verkokung anfallende Rohgas wird gekühlt, wobei Teere und Öle aus dem Gas abgeschieden werden. Das Gas wird heute nach der Aufbereitung vornehmlich als Unterfeuerungs gas genutzt. In der Vergangenheit wurde es vor allem zur Stadtgasversorgung verwendet. Der Steinkohlenteer stellt eine wichtige Rohstoffquelle für Chemiegrundstoffe dar, die als Basis für Farben, Kunststoffe, Lösungsmittel u. a. m. dienen.

3.15.4. Recycling

Recyclingstrategien sind aufgrund der vollständigen Umsetzung der Kokskohlen zu CO₂ und H₂O nicht relevant.

3.15.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit mit hüttenfähigem Koks ist eine Erweiterung der Rohstoffbasis sinnvoll. Dies ist jedoch nur erfolgreich, wenn die Kokse aus den Alternativrohstoffen ebenso hochwertig sind wie die konventionellen Stückkokse aus den Kokskohlen. Die Herstellung von Stückkoksen aus niedriger inkohlten Kohlen, z. B. Braunkohlen, erfordert daher eine rohstoffspezifische Aufbereitung durch intensive Zerkleinerung und Trocknung sowie eine nachfolgende Formgebung z. B. durch Brikettierung.

Erst dann kann durch schonende Pyrolyse der Briketts ein Stückkoks erzeugt werden. Hierzu sind neue Verfahren zur Aufbereitung und Veredlung einer möglichst breiten Rohstoffpalette zu entwickeln.

Die Herstellung von hüttenfähigem Braunkohlenkoks aus Lausitzer Braunkohle wurde in den 1950er Jahren durch Rammler und Bilkenroth begründet und daraufhin erfolgreich großtechnisch umgesetzt. An den Standorten Lauch-

hammer und Schwarze Pumpe wurden bis 1990 jährlich ca. 2,5 Mio. t Koks produziert. Dieser Koks fand Einsatz u. a. in Niederschachtöfen, in der Calciumcarbid-Industrie und als raucharmer Brennstoff. Anknüpfend an diese Erfahrungen sind Verfahren zur Herstellung hochwertiger Kokse mit deutlich verbesserten Eigenschaften gegenüber dem damaligen Braunkohlenhochtemperaturkoks aus verschiedenen Rohstoffqualitäten zu entwickeln. Daneben kann durch den gezielten Abzug des Rohgases, z. B. in mehreren Stufen, auch die Gasqualität verbessert werden. Hierdurch eröffnen sich Nutzungsmöglichkeiten einerseits in Form eines wasserstoffreichen Gases z. B. in Form von Synthesegas und des anfallenden Schwachgases nach Teerabscheidung als Unterfeuerungs gas. Aus den anfallenden Teeren können in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung wertvolle Chemiegrundstoffe gewonnen werden.

Auch die Entwicklung neuer Verfahren zur Gasaufbereitung und Wertstoffgewinnung aus dem Kokereigas sind von großem Interesse, da hierdurch die Nutzung der Nebenprodukte nicht unerheblich intensiviert werden kann. Daneben stehen vor allem Fragen der Energierückgewinnung und die Erhöhung der Umweltverträglichkeit im Vordergrund der Forschung und Entwicklung. Diese Fragestellungen sind insbesondere im Hinblick auf die Einordnung und Entwicklung des Kokereiwesens unter den Randbedingungen des Klimaschutzes und des daraus resultierenden Emissionshandels von Bedeutung.

3.16. Kupfer

3.16.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Bergwerksförderung von Kupfer betrug 2014 16,7 Mio. t und wird durch Chile (32,8%), China (8%) und Peru (7,8%) dominiert (Deutsche Rohstoffagentur 2014). Kupfer ist eines der wichtigsten Gebrauchsmetalle und zeichnet sich durch eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus. Es findet als Reinmetall oder als Legierung Einsatz im Bauwesen, Elektroindustrie, Maschinenanlagenbau sowie Straßen- und Schienenverkehr als auch in zahlreichen Gebrauchsgütern für Rohre, Kabel, Drähte, Leitungen und Blechen. Kupfer gilt als das Metall für den Ausbau der erneuerbaren Energien, wie Windkraftanlagen und den Fortschritt in der Elektromobilität.

3.16.2. Vorkommen

Eine Studie der U.S. Geological Survey kommt zu dem Ergebnis, dass in den weltweit bekannten Ressourcen

ca. 2,1 Mrd. t Kupfer enthalten sind (U.S. Geological Survey 2015).

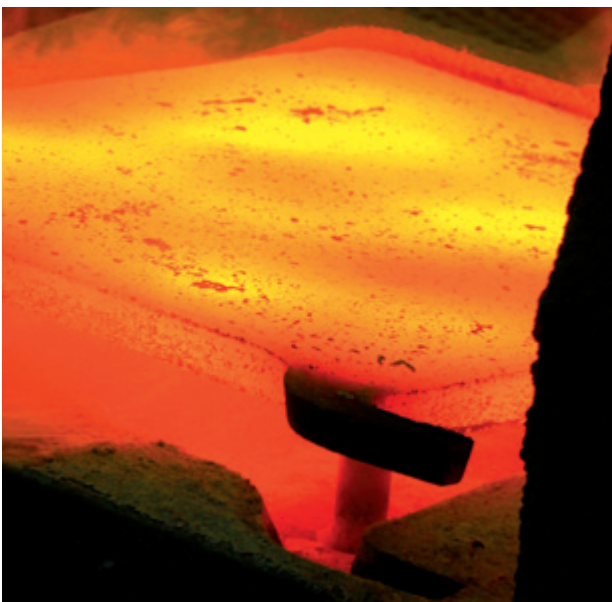
Der weltweite Kupferanteil in Konzentraten aus der Minenproduktion wird für 2015 auf 20,2 Mio. t geschätzt. Durch Erschließung weiterer Minen steigt dieser Wert bis zum Jahr 2025 auf 35,7 Mio. t an (Wood Mackenzie 2015). Das spiegelt den weltweit steigenden Bedarf an Kupfer wider, der insbesondere durch die starke Nachfrage in China erzeugt wird (Deutsche Rohstoffagentur 2013).

Die abbauwürdigen Kupfererze unterteilen sich in die sulfidischen Erze, wie Kupfersulfid/Kupferglanz (Cu_2S), Kupfer-Eisensulfid (Chalkopyrit CuFeS_2), Bornit (Cu_5FeS_4) und Carbonate, wie Malachit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$). Der Kupfergehalt der Erze ist teilweise sehr gering und reicht von 0,5% (Tagebau) bis 2% Cu (Bergbau). Zu den oxidierten Kupfererzen gehören neben den Carbonaten noch die Hydroxysilikate und Sulfate, deren Kupfergehalte jedoch oftmals geringer sind (Schlesinger 2011).

In Deutschland werden ca. 1,6 Mio. t Kupfer pro Jahr benötigt. Die Produktionskapazität für Kupfer in Deutschland liegt bei 771.000 t pro Jahr und ändert sich in der Jahresvorschau über die nächsten 15 Jahre nicht (Wood Mackenzie 2015). Um den gesamten Kupferbedarf zu decken, ist Deutschland auf Importe angewiesen.

3.16.3. Gewinnungstechnologien

Die Primärkupfererzeugung erfolgt hauptsächlich aus den sulfidischen Erzen, die nach einer mechanischen Aufbe-



Kupferanode auf dem GießBrad (Foto: Aurubis AG)

reitung und Flotation als sogenanntes Kupferkonzentrat für die pyrometallurgische Verarbeitung zur Verfügung stehen. Das Konzentrat wird bei 1.200 °C geschmolzen, um Fremdbestandteile zu entfernen, es entsteht Kupferstein. Beim Schmelzen wird der enthaltene Schwefel oxidiert und die Rauchgase oftmals zur Herstellung von Schwefelsäure weiterverwendet. In den flüssigen Kupferstein wird Luft eingeblasen und es entsteht Blisterkupfer (<99%), das zu Anoden gegossen wird. Die Anoden werden elektrochemisch aufgelöst und an den Kathoden wird sauberes Kupfer (99,99%) abgeschieden (Raffinations-elektrolyse). Dieses Kupfer kann erneut eingeschmolzen, ggf. legiert und zu Kupferprodukten verarbeitet werden. Bei der Kupferraffination fallen des Weiteren wertvolle Nebenprodukte wie Gold, Silber, Platin und Zinn im Anodenschlamm an.

Ein deutlich geringerer Anteil Kupfer wird in der Primärkupfererzeugung auf dem hydrometallurgischen Weg gewonnen. Dafür werden die gewonnenen Erze (oxidische Kupferminerale, Cu_2S) auf großen Halden über mehrere Monate mit Schwefelsäure besprenkelt. Die Schwefelsäure löst bei ihrem Weg durch den Erzkörper das Kupfer auf. Die kupferhaltige Lösung wird gesammelt und gereinigt, so dass eine reine Kupfersulfatlösung entsteht. Mittels einer Electrowinning Elektrolyse wird das Kupfer kathodisch abgeschieden. Im Vergleich zur Raffinationselektrolyse werden statt Kupferanoden inerte Bleianoden verwendet (Schlesinger 2011).

Die mikrobielle Erzlaugung (Biomining) ist eine relativ junge Methode der Kupfergewinnung und wird vor allem für metallarme, sulfidische Erze angewendet. Eisen- und schwefeloxidierende Bakterien ermöglichen die Laugung des Kupfers aus dem Gestein. Das Verfahren ist der hydrometallurgischen Kupfergewinnung sehr ähnlich (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015).

3.16.4. Recycling

Eine weitere Rohstoffquelle sind Kupferschrotte und Kupferlegierungen, die über Recyclingprozesse wieder zu reinem Kupfermetall aufgearbeitet werden. Kupfer eignet sich besonders, da es ohne Qualitätsverlust beliebig oft recycelbar ist. Der Recyclinganteil beträgt etwa 10 – 15% des Primärabbaus.

In Deutschland liegt der Anteil von Recyclingkupfer bezogen auf die Gesamtjahresproduktion bei 45%. Das entspricht knapp der Hälfte des jährlichen Kupferbedarfes, womit klar wird, dass Deutschland auf Importe angewie-

sen ist.

Bei der Sekundärkupfererzeugung werden Cu-haltige Schrotte, Legierungen und Produktionsreststoffe wieder eingeschmolzen, gegebenenfalls gereinigt und je nach Verunreinigungsgrad zu Anoden gegossen und raffiniert oder direkt zu neuen Produkten verarbeitet (Schlesinger 2011). Die Kupferproduktion aus Schrotten ist ressourcenschonender und verringert die Belastung für die Umwelt. Des Weiteren wird weitaus weniger Energie als für die Gewinnung aus Erzen benötigt, da die Zahl der Prozessschritte deutlich geringer ist (Deutsches Kupferinstitut 2015).

3.16.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Komplexität der Einsatzstoffe zählt zu den künftigen Herausforderungen bei der Kupferproduktion. Die Trenntechnologien und Reinigungsverfahren in der Primärkupferproduktion sind entsprechend anzupassen bzw. zu erweitern. Damit einher geht das Problem, dass Wertmetalle von geringer Konzentration in den primären Einsatzstoffen (z.B. Indium, Mangan, Molybdän, Seltenerdmetalle) nicht gewonnen werden können, da sie sich im Prozess nicht konzentrieren lassen und sich über viele Produkte verteilen.

Die elektrolytische Raffination gehört zwar zum Stand der Technik, birgt aber im Hinblick auf die Energiewende als ein energieintensiver Prozess (~250 kWh/t Cu) eine Herausforderung. Des Weiteren ist während des Elektro-

lyseprozesses viel Kapital gebunden, sowohl in Form von Kupfer als auch über die in der Anode enthaltenen Edelmetalle. Alternativen oder Modifikationen, wie z.B. die Hochstromelektrolyse, die die Elektrolyselaufzeit signifikant verkürzt, sind hierbei von besonderem Interesse.

Kupfer kann beliebig oft recycelt werden. Aufgrund der Diversität von Kupfer in komplexen Gebrauchsgegenständen kommt der Vorsortierung und selektiven Verarbeitung eine bedeutende Rolle zu.

Letztlich erfordern die hohen Arbeitssicherheitsstandards sowie steigende Umweltstandards eine kontinuierliche Weiterentwicklung bezüglich der Emissionsvermeidung.

3.17. Lithium

3.17.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Lithiumverbindungen finden seit langem vielfältige Anwendung in der Industrie. Lithiumcarbonat als bekanntester Vertreter verbessert in der Glasindustrie unter anderem die thermische Beständigkeit und reduziert den Wärmeausdehnungskoeffizienten, eine wichtige Eigenschaft bei der Herstellung von Ceran Kochfeldern.

Es erhöht als Additive in der Emailleherstellung die Fließfähigkeit, senkt den Schmelzpunkt und verbessert die chemische Widerstandsfähigkeit. In der Bauindustrie wird



Lithiumgewinnung aus Salzlauge in der chilenische Atacama-Wüste (Foto: Rockwood Lithium GmbH)

Lithiumcarbonat als Beschleuniger für schnell härtende Baustoffe wie Fliesenkleber oder Industrieböden verwendet.

Zudem dient Lithiumcarbonat als Ausgangsstoff für eine Reihe weiterer Lithiumsalze für vielfältige industrielle Anwendungen. Als pharmazeutischer Wirkstoff wird Lithiumcarbonat zur Behandlung der manischen Depression eingesetzt.

Lithiumhydroxid erhöht die thermische Beständigkeit in Hochleistungsschmierstoffen und wird bei der Kohlendioxid-Absorption in Unterseebooten, in der Raumfahrt und im Bergbau eingesetzt.

Lithiumchlorid hat in erster Linie Bedeutung als Ausgangsstoff für die elektrolytische Herstellung von Lithiummetall, das die Basis für die gesamte metallorganische Lithiumchemie darstellt. Organische Lithiumverbindungen (z. B. Butyllithium) finden Einsatz in der Synthese von Polymeren, pharmazeutischen Produkten, sowie der Agrochemie.

Hochreines Lithiummetall wird zudem als Anodenmaterial in kleinen hochleistungsfähigen Primärbatterien, beispielsweise für Herzschrittmacher, eingesetzt. Weiterhin findet es mehr und mehr Anwendung als Legierungszusatz für Aluminium zur Verwendung im Flugzeugbau.

Die aktuell wichtigste Anwendung von Lithiumverbindungen, allen voran Lithiumcarbonat, liegt in der Herstellung von Lithium-Ionen Batterien, einem Marktsegment mit Wachstumsraten von 10–12%. Bereits heute wird mehr als ein Viertel der jährlichen Produktion von Lithiumverbindungen zur Herstellung von Lithium-Ionen Batterien verwendet, die in portablen Elektrogeräten wie Mobiltelefonen, Notebooks, Tablets und Elektrowerkzeugen Anwendung finden.

Zusätzlich ist, bedingt durch die Markteinführung von Elektro- bzw. Hybrid-Autos auf Basis von Lithium-Ionen Akkus, eine weitere signifikante Steigerung der benötigten Lithium-Mengen zu erwarten.

3.17.2. Vorkommen

Wirtschaftlich relevante Vorkommen sind zum einen lithiumhaltige Sole in Salzseen, sowie lithiumhaltige Erze wie Spodumen, Lepidolith oder Petalit.

Im Zuge neuer Explorationen werden langfristig auch lithiumhaltiger Lehm (Hectorit) und geothermische Sole als ausbeutbare Vorkommen gesehen.

Die weltweit bekannten Lithium Ressourcen belaufen sich auf rund 35–40 Mio. t Lithium, was etwa 190–210 Mio. t Lithiumcarbonat entspricht. Auf Sole entfallen dabei rund 70% mit den großen Salzseen im Andendreieck Chile, Argentinien und Bolivien, sowie kleinere Vorkommen in China und den USA. Die lithiumhaltigen Mineralvorkommen befinden sich vor allem in Australien, USA, Canada, China und Afrika, sowie kleineren Lagerstätten in Europa.

3.17.3. Gewinnungstechnologien

Prinzipiell existieren zwei technische Verfahren zur Rohstoffgewinnung, die auf den beiden unterschiedlichen Ausgangsmaterialien basieren.

Im ersten Verfahren werden Mineralien, die zwischen 1–5% Lithiumoxid enthalten, im Tage- und Untertagebergbau gefördert, zu Erzkonzentrat mit 6–7% Lithiumoxid aufgearbeitet und in mehreren Prozessschritten zu Lithiumcarbonat weiter verarbeitet.

Das zweite Verfahren basiert auf der Verwendung von Salzlaugen aus Salzseen. Die Lauge wird aus der Tiefe gepumpt und in künstlich angelegten Evaporationsteichen in einem kontinuierlichen Verdunstungs- und Kristallisationsprozess aufkonzentriert und von anderen Salzen abgetrennt.

Das enthaltene Lithium wird von 0,1–0,2% auf rund 6% über einen Zeitraum von 18 Monaten aufkonzentriert. Anschließend erfolgt in einer Chemieanlage, in der Restverunreinigungen wie Bor, Magnesium und Calcium entfernt werden, die Fällung zu Lithiumcarbonat.

Die aktuellen technischen Herausforderungen liegen in der Optimierung der Prozessausbeute bei den bestehenden Anlagen und Prozessen. Die Mineralprozesse zeigen hohe Lithiumausbeuten, die allerdings mit einem hohen Energieaufwand assoziiert sind. Die Evaporationsverfahren zeichnen sich durch einen sehr geringen Energieverbrauch aus, zeigen aber in Abhängigkeit der anderen Salzbestandteile, wie z. B. Magnesium, recht geringe Lithiumausbeuten.

3.17.4. Recycling

Lithium wird in einigen, sehr unterschiedlichen Bereichen eingesetzt, zum Beispiel in der Pharma-, der Glas-, Keramik- und Pigmentindustrie, sowie in der chemischen Industrie (Schmiermittel) und nicht zuletzt in der Batterieindustrie. In keinem der genannten Wirtschaftszweige

wird Lithium soweit bekannt als Element durch Recycling zurückgewonnen. Da sich der größte Bedarf an Lithium in der Batterieindustrie abzeichnet, wurden in den letzten Jahren Projekte beauftragt, die Rückgewinnung von Lithium aus Batterien zu untersuchen.

Lithium-Ionen-Batterien werden heute schon einem Recycling zugeführt, unabhängig davon, ob es sich um Kleingerätebatterien oder Industriebatterien handelt. Selbst für die großen Batteriesysteme aus den xEV-Fahrzeugen existieren Recyclinglösungen. Das Recycling von Batterien verfolgt das Ziel, die Wertmetalle aus den Batteriezellen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zurückzugewinnen. Die Wirtschaftlichkeit ganz allgemein auf eine einfache Formel gebracht bedeutet: Der Recyclingaufwand muss durch den zurückgewonnenen Wert (zumindest) gedeckt sein.

Daher kann Lithium zurzeit nicht wirtschaftlich zurückgewonnen werden, zumal auch die Menge an gebrauchten Li-Ionen-Batterien noch zu gering ist. Die grundlegenden, technischen Möglichkeiten stehen als Labor- und Technikumsverfahren zur Verfügung. Doch das Maß aller Dinge ist hierbei die recht einfache Primärgewinnung von Lithium, die durch die bekannten Recyclingverfahren wirtschaftlich nicht unterboten werden kann.

3.17.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Forschung in der Lithiumchemie konzentriert sich auf neue Anwendungen in den Bereichen Energie-, Umwelttechnik und Effizienz chemischer Prozesse.

Neben Optimierung von Extraktionsprozessen für Lithium zur Erhöhung der Ressourceneffizienz sollen neue effektive Lithiumreagenzien in chemischen Prozessen weniger Abfall erzeugen und weniger Energie verbrauchen.

Im Fall von Lithium-Ionen-Akkus steht die Entwicklung leistungsfähiger Zellen im Mittelpunkt. Sowohl neue Kathodenmaterialien als auch umweltfreundliche Leitsalze und Additive wie Lithium-bis-oxalatoborat sollen dazu beitragen, das Elektroauto der Zukunft anzutreiben.

Die Entwicklung neuer Lithiummetalllegierungen wird den Bau von stabileren und leichteren Werkstoffen ermöglichen. Wegen seiner einmaligen physikalischen Eigenschaften sollte Lithium weiterhin in den Forschungs- und Entwicklungslaboratorien der Universitäten und der Industrie weltweit eine hohe Priorität eingeräumt werden.

3.18. Magnesit

3.18.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Bergwerksförderung 2014 betrug 25,08 Mio. t, wovon 64% auf China, 9,7% auf die Türkei und 5,6% auf Russland entfallen. Die Förderung von natürlichem Magnesit liegt bei 189.122 t/a. Der größte Nettoexporteur ist China mit 71%. In der Erzeugung von Feuerfestmaterialien sowie Gläsern und Keramiken findet Magnesit die größte Anwendung. Daneben ist es Bestandteil in Futter- und Düngemitteln. Als Flussmittel findet es in der Metallurgie Einsatz. Magnesit ist zudem ein guter Isolier- und Füllstoff. Magnesit wird neben Dolomit ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) als wichtigster Ausgangsstoff für die Magnesiaproduktion (MgO) durch Kalzinierung eingesetzt, welches wiederum den Ausgangsstoff für die Herstellung von metallischem Magnesium darstellt. Magnesit und kalzinierter Magnesit werden aber auch in der Abgasreinigung zur Entschwefelung und kalzinierter Magnesit in der Abwasserreinigung zur Neutralisation (pH-Stabilisierung) eingesetzt. Zu erwähnen ist auch die Bedeutung von gefälltem Magnesit als Füllstoff in der Pharma-, Papier- und Kunststoffindustrie.

3.18.2. Vorkommen

Natürlicher Magnesit ist ein in der Erdkruste weit verbreitetes Mineral, das in unterschiedlicher Reinheit (diese reicht von fast reinem Magnesiumcarbonat zu verschiedenen Mineralen mit Quarz, Aluminosilikaten bis Dolomit) vorkommt. Bedingt durch die ähnliche Ionengröße kommt Magnesit häufig als isomorphes Mineral mit Eisen vor. Reiner natürlicher Magnesit kann durch selektiven Abbau direkt gewonnen werden. Abbauwürdige Vorkommen für reinen Magnesit gibt es vor allem in China, Russland und Nordkorea. Die weltweiten Ressourcen werden auf 12 Mrd. t geschätzt und können als unerschöpflich angesehen werden. Die Eingliederung von Magnesit als kritisches Mineral erfolgt demnach nicht auf Grundlage einer Ressourcenverknappung, sondern aufgrund der starken Länderkonzentration in China. Derzeit werden einige europäische Minen, wie z.B. in Griechenland, wieder eröffnet, um kalziniertes Magnesia zu exportieren.

3.18.3. Gewinnungstechnologien

Aus qualitativ hochwertigen Lagerstätten kann Magnesit direkt gewonnen und verarbeitet werden. Abhängig von der Qualität des bergmännisch abgebauten Minerals und der Verwendung gibt es für die Aufbereitung eine Reihe von physikalischen Aufbereitungsverfahren, beispielsweise

se Flotation, und thermische Verfahren, zu erwähnen ist die Kaustifizierung oder Teilkaustifizierung von Dolomit, mit nachgeschalteter Raffination durch mehrstufige Recarbonatisierung. Als Ausgangsstoff für die Herstellung von hochreinem Magnesit muss auch die Technologie der Meerwasser-Magnesitgewinnung erwähnt werden.

3.18.4. Recycling

Während das Recycling von Magnesia und Magnesium auf ausgereifte Technologien zurückgreifen kann, ist das Recycling von Magnesit selbst nicht etabliert. Das liegt bei hochwertigen Anwendungen, zum Beispiel Füllstoff in der Papierherstellung, an den hohen Qualitätsanforderungen, bei Isoliermassen wiederum an der Körnung und möglicher Kontamination.

3.18.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Eigenständige Verfahren zum Recycling von Magnesit sind derzeit noch nicht entwickelt, ebenso sind die Möglichkeiten zur Substitution begrenzt. Recyclingtechnologien wären weitgehend an die Weiterentwicklung von Gewinnungstechnologien gebunden. Im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung in der Erzaufbereitung ist der Aufwand für die Magnesitverwertung, auch aus Abraum, durchaus als Forschungs- und Entwicklungsfeld zu hinterfragen.

3.19. Magnesium

3.19.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Im Rahmen einer Marktbetrachtung des chemischen Elements Magnesium ist zwischen dem metallischen Magnesium (Mg) und verschiedenen Magnesiumverbindungen, insbesondere Magnesiumoxid (MgO), zu differenzieren.

Im Verbund mit Aluminium hat metallisches Magnesium eine große wirtschaftliche Bedeutung als Leichtbauwerkstoff. Das Haupteinsatzgebiet von reinem Magnesium ist mit ca. 45% die Herstellung von Aluminiumlegierungen, um die Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Werkstoffe zu verbessern. Aluminiumlegierungen werden vor allem in der Verpackungsindustrie, z.B. zur Produktion von Dosen oder Folien, sowie im Karosseriebau der Transport- und Automobilindustrie verwendet. Ferner wird metallisches Magnesium in Form von Magnesiumlegierungen verwertet (ca. 35%). Angesichts der geringen Dichte des Magnesiums ($1,74 \text{ kg/m}^3$) und der guten

Dämpfungseigenschaften kommen diese Legierungen insbesondere in der Unterhaltungselektronik und im Fahrzeugbau zum Einsatz. Das Magnesium wird überwiegend als Druckgusslegierung verarbeitet, um beispielsweise Gehäuse von Smartphones, Tablets und Laptops oder Antriebsstränge, Lenkungssysteme, Motorblöcke, Sitzschalen etc. für Fahrzeuge herzustellen. Der dritte wesentliche Anwendungsbereich ist der Einsatz als Entschwefelungsmittel (ca. 13%) bei der Roheisenbehandlung in der Stahl- und Eisenindustrie. Sonstige Anwendungen (ca. 7%), z.B. als kugelgraphitbildender Zusatz bei der Gusseisenproduktion, als Reduktionsmittel bei Metallerzeugungsprozessen sowie als Opferanodenelement in der Elektrochemie, nehmen eine untergeordnete Stellung ein. Entsprechend der Entwicklung der Hauptanwendungsgebiete hat sich die globale Nachfrage nach metallischem Magnesium seit dem Jahr 2000 mit einer jährlichen Wachstumsrate von 6,6% mehr als verdoppelt. Nach Schätzungen der USGS betrug 2014 die weltweite Produktion von Primärmagnesium 907.000 t. Bei einem Preis von 2.000 – 2.400 USD/t entspricht dies einem Marktvolumen von rund 2 Mrd. USD.

Ein weitaus größeres Volumen weist der Markt von Magnesiumverbindungen auf, der ebenfalls seit dem Jahr 2000 mit einer mittleren Wachstumsrate von 6% p.a. stark gewachsen ist und derzeit bei ungefähr 7 Mio. t (Mg-Äquivalent) liegt. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang Magnesiumoxid (Magnesia) als wichtigste industrielle Magnesiumverbindung, wobei zwischen totgebrannter Magnesia (DBM), kaustisch gebranntem Magnesit (CCM) und Schmelzmagnesia (FM) zu differenzieren ist. Magnesia (DBM/FM) wird zur Erzeugung von Feuerfestmaterialien für Brenn- und Schmelzprozesse in der Zement-, Glas- sowie Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt. Die Anwendung von Magnesiumverbindungen als Refraktärwerkstoff ist jedoch aufgrund der fortschreitenden Werkstoffentwicklung, insbesondere der Substitution von totgebrannter Magnesia durch Schmelzmagnesia, rückläufig. Zunehmend werden die Salze (CCM) als Düngemittel zur Kalkung von Ackerflächen, als Säureregulator in der Lebensmittel- und Tierfutterindustrie oder zur Entkieselung in der Wasseraufbereitung eingesetzt.

3.19.2. Vorkommen

Magnesium ist gemäß der Masse das achthäufigste Element der Erdkruste und kommt in der Natur wegen seiner Reaktionsfreudigkeit nicht in elementarer Form vor. Die wichtigsten Mineralien sind Dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), Magnesit (MgCO_3), Olivin ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$) und Kieserit $\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$. Des Weiteren wird Magnesium aus Salz-

seen bzw. Solen und Meerwasser gewonnen, die zwischen 0,7% und 0,13% des Erdalkalimetalls enthalten. Die verfügbaren Ressourcen, aus denen metallisches Magnesium bzw. Magnesiumverbindungen gewonnen werden können, sind vielfältig, geographisch homogen verteilt und reichhaltig. Beispielsweise betragen nach aktuellen Schätzungen der USGS die Magnesit-Ressourcen als typischer Ausgangsstoff der Magnesiumoxidherstellung rund 12 Mrd. t (Mg-Äquivalent). Reines Magnesium wird vorwiegend aus Dolomit oder Magnesiumchlorid gewonnen, die ebenfalls eine Ressourcenverfügbarkeit von mehreren Mrd. t aufweisen.

3.19.3. Gewinnungstechnologien

Sowohl das metallische Magnesium als auch Magnesiumverbindungen werden zum allergrößten Teil (>80%) in der VR China produziert, begünstigt durch das große Ressourcenangebot an magnesiumhaltigen Rohstoffen sowie Kohle als Energieträger und Silicium als Reduktionsmittel.

Bei der Gewinnung von Magnesiumoxid ist grundsätzlich zwischen der trockenen (Ausgangsstoff Magnesit MgCO_3 , gelegentlich Brucit $\text{Mg}(\text{OH})_2$ als Nebenprodukt der Meerwasseraufbereitung) und der nassen (Ausgangsstoff Bischofit $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Dolomit, Meerwasser) Prozessroute zu differenzieren. Klassischerweise wird Magnesiumoxid durch Kalzinierung von Magnesit gewonnen.

In Hochtemperaturöfen entsteht bei etwa 800°C als Zwischenprodukt zunächst kaustisch gebrannter Magnesit (CCM). Um totgebranntes Magnesia (DBM) oder Schmelzmagnesia (FM) zu erzeugen, ist in einem zweiten Prozessschritt das CCM in einer Phase oder zwei Phasen auf 1.600°C und 2.200°C (DBM) bzw. oberhalb von 2.800°C (FM) zu erhitzen.

Ebenso wie bei Magnesia lassen sich auch bei der Erzeugung von metallischem Magnesium im Wesentlichen zwei industrielle Verfahrensrouten unterscheiden: die thermische Reduktion von Magnesiumoxid (Pidgeon-Prozess) und die Schmelzflusselektrolyse von geschmolzenem Magnesiumchlorid. Obwohl der 1944 entwickelte Pidgeon-Prozess wenig energieeffizient und mit einer sehr hohen CO_2 -Emission (27,4 kg CO_2 -Äqu/kg – 40,3 kg CO_2 -Äqu/kg) verbunden ist, bildet diese relativ einfache Technik den Standard der Primärmagnesiumgewinnung in der VR China. Beim Pidgeon-Prozess wird Dolomit zu $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$ kalziniert. Das Magnesiumoxid wird mit Hilfe von Ferrosilicium bei einer Temperatur von 1.200°C und einem Druck von etwa 100 Pa in Retorten zu reinem Magnesium redu-

ziert, während das Calciumoxid eine basische Calciumsilikatschlacke bildet.

Alternativ lässt sich Magnesium mittels einer Schmelzflusselektrolyse (hier: Norsk Hydro-Verfahren) erzeugen. Obgleich das Norsk Hydro-Verfahren bereits in den 80er Jahren den Stand der Technik darstellte, findet es aufgrund der hohen Investitionskosten erst seit Kurzem Anwendung in der VR China. In einem ersten Schritt der Schmelzflusselektrolyse muss die magnesiumchloridreiche Salzlösung von Schwermetallen, Sulfaten, Bor und Brom gereinigt und entwässert werden, um eine hohe Material- und Stromausbeute zu erzielen. Magnesiumchlorid kristallisiert unter Einschluss von Kristallwasser als Hexahydrat. Dieses Wasser reagiert beim Elektrolyseprozess mit Magnesiumchlorid bzw. mit bereits reduziertem Metall zu Magnesiumoxid, welches aufgrund der geringen Löslichkeit einen Zellschlamm bildet. Die notwendige Entfernung des Kristallwassers erfordert einen mehrstufigen Trocknungsprozess, um die thermische Zersetzung des Hydratwassers zu vermeiden. Das wasserfreie Magnesiumchloridsalz wird anschließend in die Elektrolysezelle im Gegenstrom zum elektrolytisch erzeugten Chlor eingelassen und bei etwa 700°C elektrochemisch gespalten. Dabei zeichnet sich die Zelle von Norsk Hydro durch eine zweiseitige Nutzung der Kathoden, einen folglich geringen Elektrodenabstand und einen geringen Badwiderstand aus.

Neuere Technologien, wie die carbothermische Reduktion, der Zuliani Prozess, sowie der Solid Oxide Membrane (SOM) Prozess, versprechen eine rohstoffeffizientere, energiesparsamere und umweltverträglichere Methode zur Gewinnung von metallischem Magnesium. Sowohl der von Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) erforschte carbothermische als auch der von Zuliani entwickelte gleichnamige Prozess haben bereits die Marktreife erreicht.

3.19.4. Recycling

Das Magnesiumrecycling konzentriert sich vornehmlich auf die Verwertung von Magnesiumschrotten aus Aluminiumlegierungen, wobei die Recyclingprodukte hauptsächlich als Entschwefelungsmittel in der Eisen- und Stahlindustrie oder als Behandlungsmittel zur Kugelgraphitbildung in Gießereien zum Einsatz kommen. Beispielsweise werden beim Recycling von Aluminium-Dosen jährlich ca. 15.000 t Magnesium als Nebenprodukt wiedergewonnen. Hierbei handelt es sich jedoch um ein so genanntes „Downcycling“, da das Alt-Magnesium aufgrund

von Verunreinigungen nicht in neue Legierungen eingehen kann. Ein Recycling im klassischen Sinne findet nur beim werksinternen Wiedereinschmelzen von sauberen Produktionsabfällen statt.

Generell werden gemäß ISO acht Klassen an Magnesiumschrott (1 – Sortierte, saubere Abfälle bis 8 – Gemischte und Ausschuss-Abfälle) unterschieden. Nach Schätzungen von Neelameggham/Brown umfasste die weltweite Recyclingkapazität von Magnesium im Jahr 2010 ca. 200.000 t, zusätzlich werden ca. 30.000 t werksintern recycelt.

Prinzipiell können beim Magnesiumrecycling je nach Verschmutzungsgrad des Ausgangsmaterials zwei Verfahrensansätze unterschieden werden: salzfreies und salzgestütztes Aufschmelzen und -legieren. Geringfügige Verschmutzungen der Magnesium-Rückläufe, d.h. Magnesiumschrott der Klasse 1 (Angüsse, Überläufe, Pressreste und Gussausschussteile), können ohne den Einsatz von Reinigungssalzen ausgeschieden werden. In einem meist zweistufigen Prozess erfolgt eine Gasreinigung sowohl im Magnesium-Schmelzofen als auch im Warmhalteofen. Zudem wird während des gesamten Prozesses eine Abdeckung mit Schutzgas vorgenommen, um eine Oxidation der Magnesiumschmelze zu verhindern. Größere Verunreinigungen des Magnesiumschrotts (Klasse 2 und höher), häufig in Form von Eisen, Kupfer und Nickel, müssen mit Hilfe von Reinigungssalzen behandelt werden, um eine Sekundärlegierung zu erstellen. Die chloridbasierten Reinigungssalze dienen dem effizienten Trennen der freien Metalle. Gelegentlich werden die eingeschmolzenen Magnesiumschrotte auch mit reinem Primärmagnesium verdünnt, um den Grad der Verunreinigungen unter den vorgegebenen Grenzwerten zu halten.

Zurzeit laufen u.a. in China, Australien und Deutschland Untersuchungen, Magnesium aus Filteraschen von Braunkohlekraftwerken zu gewinnen. Die Gehalte an MgO in derartigen Rückständen der Kohleverstromung können größenordnungsmäßig 15 Gew% betragen, so dass sie eine interessante, alternative Magnesium-Ressource darstellen können. Die Extrahierbarkeit von Mg ist allerdings stark von seiner mineralogischen Bindungsform und anderen Aschebestandteilen abhängig und die Eignung von Aufbereitungs- und Gewinnungsverfahren entsprechend zu prüfen.

3.19.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Erzeugung von metallischem Magnesium basiert auf einem sehr energieintensiven Prozess, der im Falle der

Schmelzflusselektrolyse, inkl. des Trocknungsprozesses, bis zu 35 KWh pro kg erfordert. Demgegenüber werden beim Einschmelzen von Magnesiumschrott weniger als 3,5 KWh pro kg benötigt. Ein wesentlicher Hebel zur Verbesserung der Energieeffizienz ist deshalb die Weiterentwicklung von Recyclingtechniken. Gleiches gilt für Magnesia-basierte Refraktärwerkstoffe, wie die Magnesia-Kohlenstoff-Steine, die z.T. aufgearbeitet werden, um erneut als Feuerfestmaterialien oder ggf. im Straßenbau wiederverwendet zu werden.

Somit besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Verbesserung der Energieeffizienz, der Optimierung der Prozesssteuerung und der Verminderung der Schadstoffemissionen.

3.20. Niob

3.20.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Niob zählt zu den Übergangsmetallen und, neben Tantal, Molybdän, Rhenium und Wolfram, aufgrund seines hohen Schmelzpunktes von 2.468 °C zu den Refraktärmetallen. Entdeckt wurde es 1801 gemeinsam mit seinem „Schwestermetall“ Tantal von Charles Hatchett, der es Columbium (Cb) nannte.

Die Verwendung von Niob erfolgt vor allem als Stahlveredler in Form des Einsatzes von FeNb (ca. 88% der Nachfrage). Bereits geringe Anteile von <1% im Stahl erhöhen dessen Festigkeit ganz erheblich (HSLA-Stähle). Einsatzbereiche sind: Pipeline-Rohre, konstruktiver Stahlbau, Karosseriebleche. Weitere Anwendungen sind: Legierungsbestandteil für supraleitende Drähte, als Oxid Einsatz in der Herstellung von Spezialgläsern mit hohem Brechungsindex, und als Katalysator. Der weltgrößte Niob-Bergbaubetrieb, die brasilianischen CBMM, betreibt seit über 43 Jahren ein Programm zur Marktentwicklung für niobhaltige Produkte.

3.20.2. Vorkommen

Das Hauptmineral für die Niobgewinnung ist Pyrochlor, das in zwei von drei für Niob wichtigen Lagerstättentypen vorkommt: Alkaligesteinskörper und Karbonatit-Komplexe, in deren Verwitterungszonen Gehalte von bis zu 3% Niob auftreten. Die dritte Lagerstätten-Kategorie besteht aus Graniten und daraus abgeleiteten Pegmatiten, in denen Nb als Mineral der Columbit-Reihe auftritt. Die derzeit bekannten Reserven und Ressourcen reichen für die

nächsten ca. 500 Jahre (British Geol. Survey, Niobium-Tantalum commodity profile, 2011)

Die Listung von Niob als strategisch wichtigem Metall ist aufgrund der vielseitigen Einsatzfelder nachvollziehbar; als versorgungskritisch kann es jedoch nur insofern bezeichnet werden, als man die dominante Rolle Brasiliens bereits als kritisch ansehen will.

3.20.3. Gewinnung

Zwei Routen der Gewinnung sind von Bedeutung: (1) der Weg von Pyrochlor über Aufbereitung und Aluminothermie zu Ferroniob, und (2) die Route über chemischen Aufschluss, Trennung von Tantal und Niob über Flüssig/Flüssig-Extraktion zu Oxid und ggf. Reduktion zu Metall. Die Aufbereitungsverfahren müssen insbesondere den hohen Feinstkornanteil in Pyrochlor-Verwitterungslagerstätten berücksichtigen, was zu relativ hohem Niobverlust in der Schlamm-Fraktion führt.

Die Reinheit der Produkte wird durch entsprechende Reinigung des Flotationskonzentrates mittels leaching bzw. die Flüssig/Flüssig-Extraktion sichergestellt.

Die Nachfrage liegt derzeit bei knapp unter 100.000 t pro Jahr; aus Gründen der Versorgungssicherheit plant CBMM die Inbetriebnahme von Kapazitätserweiterungen in 2016, die zu einer Gesamtleistung von ca. 150.000 t FeNb (entspricht allein 90.000 t Nb) führen.

3.20.4. Recycling

Recycling von Niob ist nicht stark ausgeprägt, da die Spezialstähle von eher langlebiger Natur in ihren Einsatzfeldern sind. Ein Großteil des bisher erzeugten Niobs ist daher noch im ersten Produktzyklus gebunden. Aufgrund der guten Versorgungslage und der geringen Niobkonzentration im Stahl ist Recycling weder dringend erforderlich noch wirtschaftlich aussichtsreich.

3.20.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Anwendungsbreite von Niob ist in den vergangenen Jahrzehnten systematisch ausgebaut worden. Das Unternehmen CBMM baut in Araxa (Bundesstaat Minas Gerais) eine Lagerstätte ab, die allein für ca. 400 Jahre ausreichen kann. Insofern ist aus Interesse der Zukunftssicherung die stetige Unterstützung von F&E-Arbeiten Dritter eine nachvollziehbar sinnvolle Firmenstrategie.

3.21. Phosphate/Phosphatgestein

3.21.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Phosphor ist eine nicht substituierbare, für alles Leben essenzielle Ressource, die beim Aufbau und Funktion der Organismen in zentralen Bereichen wie der DNA und der zellulären Energieversorgung (ADP/ATP) beteiligt ist.

Der weitaus größte Anteil der Phosphatproduktion geht in die Herstellung von Phosphorsäure (> 75%). Sie wird sowohl durch Aufschluss von Apatit mit Schwefelsäure (Aufschlussphosphorsäure) als auch durch Verbrennen von Phosphor („thermische Phosphorsäure“) hergestellt. Wegen des hohen Energiebedarfs nimmt der Anteil der thermisch erzeugten Säure zugunsten der Aufschlussäure seit Jahren stetig ab, und in den Anwendungsgebieten, bei denen es auf eine besondere Reinheit der Phosphorsäure ankommt, verwendet man zunehmend nachgereinigte Aufschlussäure. Auf den Einsatz in Waschmitteln zur Wasserenthärtung wird in Europa mittlerweile wegen der Eutrophierung von Gewässern weitgehend verzichtet. In der Phosphorsäurequalität wird zwischen „merchant grade“ (52–54% P_2O_5 , was einem Gehalt an H_3PO_4 von ca. 75% entspricht), „animal grade“ oder „feed grade“ mit >70% H_3PO_4 sowie „food grade“ mit wesentlich höherer Reinheit und H_3PO_4 -Konzentrationen von 75–85% (P_2O_5 -Gehalt von 54–62%) unterschieden.

Der Großteil der Phosphorsäureproduktion geht in die Herstellung von Düngemitteln. So wurden 2010 weltweit ca. 40,5 Mio. t P_2O_5 als Mineraldünger in der Landwirtschaft ausgebracht (IFA 2012). In Deutschland gehen ca. 50% der Aufschlussäure in diesen Bereich, in den USA sind es sogar mehr als 90%. Phosphate sind als Lebensmittelzusatzstoffe zugelassen und dienen als Konservierungsmittel, Säuerungsmittel, Säureregulator und Emulgator. In der Fleischindustrie dienen sie zur Regulation des Wassergehaltes der Fleischwaren, weitere Anwendungen sind Milchprodukte bis hin zum Schmelzsalz für Schmelzkäse. Ferner werden sie als Futtermittel, Korrosionsschutzmittel (Phosphatierung) und Flammenschutzmittel eingesetzt. Phosphorsäure selbst wird u.a. zur Metallbehandlung eingesetzt.

Hinsichtlich des diskutierten Versorgungsrisikos wurden 2012 globale Phosphatreserven von 67 Mrd. t bestimmt. Bei einer Jahresförderung von 54 Mio. t wurde die dynamische Reichweite auf > 320 a geschätzt (BGR 2013; Scholz, Wellmer 2013). Die Diskussion um einen ‚Peak Phosphorous‘ für das Jahr 2035 wird durch die vorliegenden Da-

ten nicht gestützt. Als in der Tat problematisch erweisen sich indes die zunehmenden Verunreinigungen der Phosphaterze mit Schwermetallen. Weitere Risiken ergeben sich aus Monopolstellungen beim Rohstoff, wodurch es mittel- bis langfristig zu Engpässen und Preissteigerungen kommen kann (Bundesregierung, 2013). So stieg die Nachfrage nach Phosphatdünger seit 1960 um 400%, vor allem durch einen dramatischen Nachfragezuwachs durch Schwellenländer, aufgrund dessen eine Verdoppelung des P-Verbrauchs bis 2050 gegenüber 2015 erwartet wird. Dem gegenüber steht lediglich eine Teilkompensation durch einen Nachfrageeinbruch der Industrienationen um 50% seit 1990.

3.21.2. Vorkommen

Phosphor kommt fast ausschließlich in Form von Apatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$ in der Natur vor. Dabei enthalten Apatite neben Phosphor auch andere Elemente wie Calcium, Fluor, Chlor, Thorium, Uran, Cadmium, Vanadium oder Seltenerdmetalle. Die größten Phosphorvorkommen gibt es in Marokko und der Westsahara, China, den USA (Florida), Südafrika und Jordanien. Deutschland ist vollständig vom Import abhängig. Unter den Lagerstättentypen dominiert der sedimentäre Typ (~90%). Magmatische Lagerstätten konzentrieren sich in wesentlichen auf Russland und Südafrika. Untergeordnet wird noch Guano produziert. Die sedimentären Vorkommen werden heute vor allem in Küstennähe abgebaut und weisen im Vergleich zu den magmatischen zwar größere Anteile an Störstoffen auf, haben jedoch oftmals einen höheren Phosphatgehalt.

3.21.3. Gewinnungstechnologien

Weißer Phosphor wird außerhalb Europas in elektrischen Lichtbogenöfen durch eine Umsetzung der phosphorhaltigen Erze mit Koks und Quarzsand bei ca. 1.400°C hergestellt. Er dient als Basis vieler in der chemischen Industrie benötigten phosphorhaltigen Chemikalien wie Phosphortrichlorid (PCl_3).

Zur Herstellung von Düngemitteln werden die meist unlöslichen Erze durch Aufschlussverfahren mit Mineralsäuren in Phosphorsäure oder lösliche Phosphatsalze überführt. Das Nebenprodukt Calciumsulfat wird abgetrennt (Phosphorgips oder Phosphogips). Seine Verwertbarkeit ist für die Gesamtprozessökonomie maßgeblich.

Die Düngemittel-Phosphorsäure oder Merchant-grade Phosphorsäure dient ebenfalls als Rohstoff zur Herstellung von Food-grade Phosphorsäure, die auch in Deutsch-

land zu lebensmittelreinen Phosphaten verarbeitet wird. Deren Anwendung ist vielfältig und weit verbreitet.

In der Landwirtschaft hat sich ein Kombinationsdünger von Phosphor mit Stickstoff und Kalium, sog. NPK-Dünger, durchgesetzt. Dazu werden die unterschiedlichen Nährstoffträger kombiniert und granuliert. Die Kombination von Calciumdihydrogenphosphat und Gips wird als Superphosphat bezeichnet und ebenfalls als Dünger eingesetzt. Tripelsuperphosphat oder Doppelsuperphosphat werden aus Rohphosphat und Phosphorsäure hergestellt und weisen einen höheren Gehalt an Phosphor auf.

3.21.4. Recycling

Ein P-Recycling findet gegenwärtig nicht statt (USGS, 2015). Die zunehmenden Störstoffgehalte in den Phosphaterzen sowie das strategische Bestreben zur Sicherung der Rohstoffversorgung mit Phosphor wurden schon vor ca. 15 Jahren zum Anlass genommen, mit der Entwicklung von P-Recyclingverfahren zu beginnen. Als Sekundärrohstoffe kommen z.B. Klärschlamm, Gülle, Knochen und Biomasse in Betracht. Bis dato wurden ca. 50 verschiedene Verfahren im Labormaßstab entwickelt, von denen lediglich ein Teil den Sprung in den Technikums- bzw. Pilotmaßstab geschafft hat. Für sie ist derzeit eine wirtschaftliche Umsetzung entweder auf absehbare Zeit nicht darstellbar bzw. lässt sich aus der verfügbaren Datenlage eine wirtschaftliche Durchführung nicht belegen.

Die Notwendigkeit eines wirkungsvollen P-Recyclings ist indes auf lange Frist unstrittig und auch erwünscht, entlastet es doch die Umwelt und mindert Deutschlands Abhängigkeit von Phosphat/Phosphor-Importen.

3.21.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Qualität der Rohstoffe in den Lagerstätten ist sehr unterschiedlich und nimmt gerade in Bezug auf die Schwermetall- und Radionuklidgehalte kontinuierlich ab. Vor allem gesundheitsgefährdende Elemente wie Cadmium oder Uran schränken die Verwendbarkeit im Düngemittelsektor ein. Die kostengünstige Entfernung von Störstoffen aus Erzen wird zukünftig vermehrt erforderlich sein, damit die existierenden Phosphatquellen weiter nutzbar bleiben, und die Ernährung der Bevölkerung sichergestellt werden kann. In diesem Zusammenhang sind v.a. neue und weitergehende Separationstechnologien zu entwickeln.

Hinsichtlich der Rohstoffsicherung ist eine Kreislaufführung von Phosphor anzustreben, was kostengünstiger

Verfahren bedarf, welche die Verwertbarkeit von Phosphor aus den verschiedenen Sekundärmaterialien wie Klärschlamm und Knochen zum Ziel haben.

3.22. Seltenerdmetalle

Scandium (Sc), Yttrium (Y), Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Lutetium (Lu)

3.22.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Metalle der Seltenen Erden (SE), zu denen die IUPAC offiziell Scandium, Yttrium und die gesamte Lanthanoidengruppe zählt, sind heute unverzichtbare Bestandteile von Komponenten in Elektronik und automobilen Anwendungen sowie in der modernen Produktions-, Automatisierungs- und Energietechnik. Die größte wirtschaftliche Bedeutung haben Neodym und Dysprosium, die legiert mit Eisen und Bor die Herstellung von Permanentmagneten mit hohen Energiedichten ermöglichen. Diese Magnete können auch Praseodym und Terbium enthalten. Samarium wird zusammen mit Kobalt für die Herstellung einer anderen Klasse an seltenerdhaltigen Permanentmagneten verwendet – allerdings in deutlich geringeren Mengen. Nd-Fe-B- und Sm-Co-Magnete werden in Elektromotoren und Generatoren verbaut und finden sich in vielfältigen elektromechanischen, elektronischen und mechanischen Anwendungen. Die Nachfrage belief sich im Jahr 2012 auf 22.500 t Neodym-Oxid (Wall 2014, ERECON 2015). Wichtige weitere Anwendungsfelder der SE sind Superlegierungen, Katalysatoren z. B. in der Automobilität (Cer) und Petroindustrie (Lanthan und Cer in Zeolithstrukturen), optische Anwendungen u. a. in Bildschirmen oder Linsen (Europium und Yttrium; Cer), Lasern (Yttrium) und Energie-Technologien (Brennstoffzellen, Kondensatoren, Lanthan in NiMH-Batterien). Insgesamt bestand im Jahr 2012 eine weltweite Nachfrage von 115.000 t SE-Oxid, wobei bis 2016 eine Steigerung von ca. 40% möglich ist (Wall 2014). SE finden somit vielfach in Hochtechnologiebereichen Anwendung, wo sie zwar in relativ geringen Massen, jedoch mit einer meist sehr spezifischen Funktion eingesetzt werden. In den meisten Anwendungen sind Seltenerdmetalle nur schwer, meist überhaupt nur durch andere, günstigere Metalle der Gruppe zu substituieren. 2014 erklärte die Europäische Kommission sowohl die leichten als auch die schweren Seltenerdmetalle aufgrund der wirtschaftlichen Relevanz, ihrer geringen aktuellen Rezyklierung (<1%)

und des hohen Versorgungsrisikos zu den für die EU kritischen Rohstoffen (Europäische Kommission 2014).

3.22.2. Vorkommen

Der mit Abstand größte Anteil an der weltweiten Produktion (ca. 90%) und an weltweiten Exporten von Seltenen Erden (ca. 45%) liegt bei China. Grund dafür sind die großen Vorkommen in der Bayan Obo-Lagerstätte, wo Seltenerdmetalle als Nebenprodukt der Eisenerzförderung anfallen. Seltenerdmetalle liegen oft in oxidiertem Form in der Erdkruste vor, wirtschaftlich genutzte Vorkommen sind zumeist Cer-dominante Carbonate oder Phosphate, wobei letztere häufig auch Yttrium-dominant vorliegen. Die Unterscheidung zwischen leichten und schweren Seltenerdmetalle ist vor allem durch das gemeinsame Auftreten in der Erdkruste begründet, die genaue Abgrenzung ist bis heute aber noch umstritten (Wall 2014). Leichte Seltenerdmetalle wie Lanthan, Cer und Neodym sind in der Erdkruste deutlich häufiger als schwere wie etwa Dysprosium oder Terbium. Die weltweiten Reserven an Seltenerdmetallen liegen zu den größten Teilen in China (ca. 55 Mio. Tonnen), Russland (ca. 19 Mio. Tonnen) den USA (ca. 13 Mio. Tonnen), Indien, Australien, Grönland und Kanada, wobei allerdings bis heute nur wenige in China, Russland, den USA und Australien ausgebeutet werden und viele sich bisher nur in der Projektphase befinden (Wall 2014). Es ist festzuhalten, dass aufgrund der derzeit volatilen Marktlage in Bezug auf Seltenerdversorgung und -bedarf sowohl die Förderung als auch die Wiedergewinnung von Seltenerdmetallen nur schwer vorherzusagen ist.

3.22.3. Gewinnungstechnologien

Wichtige Mineralien der SE-Lagerstätten sind vor allem Bastnäsit (vorrangig in USA und China) und Monazit (Begleiterz in anderen Lagerstätten, vorrangig in Australien, Südafrika, China, Indien, Brasilien, Malaysia) (Humphries 2013). Die primäre State-of-the-art-Produktion von Seltenerdmetallen aus Erzen ist sowohl energieintensiv als auch teilweise durch den Einsatz von Laugungsreagenzien gekennzeichnet, je nach Lagerstätte und Zielement sind jeweils spezifische Aufbereitungs- und Trennungsschritte erforderlich. Die Erze werden zunächst gebrochen, gemahlen und meist per Flotation von ungewünschten Mineralen getrennt. Erzkonzentrate werden zumeist per Laugung (Schwefel-, Salzsäure) bei hohen Temperaturen gelöst und selektiv getrennt, wobei verschiedene Verfahren (Fällung, Kristallisation, Ionentausch, Lösungsmittelextraktion) zum Einsatz kommen. Die Abtrennung von Cer in der US-amerikanischen Mountain Pass Mine findet

auch in einem Röstungsschritt statt, wobei Ce^{3+} -Ionen bei $620\text{ }^\circ\text{C}$ mit Luft weiter oxidiert werden und von den restlichen Seltenerd-Oxiden per Salzsäurelaugung getrennt werden können. Ein neueres Verfahren der Mountain Pass Mine verwendet die Gegenstromextraktion zur Trennung von leichten und schweren Seltenerdmetalle (Molycorp Inc. 2013). Ein wichtiger Aspekt der Primärgewinnung ist auch die Abtrennung und Behandlung von radioaktivem Uran oder Thorium, das in vielen Seltenerd-vorkommen in Konzentrationen von bis zu 10% vorliegt.

3.22.4. Recycling

Die Recyclingquote für SE liegt außerhalb Chinas bei $<1\%$. Da die SE in vielen Baugruppen nur in sehr geringen Mengen eingesetzt werden, fokussieren die aktuellen Anstrengungen für das Recycling auf wenige Materialgruppen. Die europäische Arbeitsgruppe ERECON hat 2015 eine Prioritätenliste vorgelegt: 1. Permanentmagnete (Nd, Pr, Dy, Tb, Sm); 2. Leuchtstoffe (Eu, Tb, Y, Ce, Gd, La); 3. Batterien (La, Ce, Nd, Pr); 4. Schleif- und Poliermittel (Ce); 5. Katalysatoren (La, Ce, Pr, Nd, Y). Die Kriterien waren Verfügbarkeit des Reststoffstroms, Möglichkeiten zur Identifizierung der SE-tragenden Komponente; Sammelrate, in den Markt gebrachte Masse, Anteil an SE im Material, Verfügbarkeit einer Extraktionstechnologie sowie Anteil an hochwertigen SE, wie bspw. Dysprosium, im Materialstrom. Das Recycling von SE muss im Kontext zwischen Logistik und Technologie gesehen werden. Es muss ein spezifischer Wertstoffstrom durch eine Sammellogistik bereitgestellt werden oder es muss möglich sein, SE-haltige Komponenten einfach aus konventionellen Recyclingstoffströmen zu entfernen. Eine Trenntechnik, die selektiv auf SE-haltige Materialien wirkt, existiert nicht, sodass im mechanischen Recycling nur indirekt ein SE-haltiges Konzentrat über sensorbasiertes Vorsortieren, magnetische Anreicherung oder selektive Zerkleinerung erzeugt werden kann. Dieses Vorkonzentrat wird dann entweder einem hydrometallurgischen Prozess, teilweise mit Vorschaltung einer pyrometallurgischen Behandlung, zugeführt. Die Auftrennung in die einzelnen SE-Elemente erfolgt mit den identischen Technologien wie im Primärrohstoffbereich. Dadurch, dass keine radioaktiven Bestandteile im Recyclingstrom vorliegen und auch die Zahl der SE-Elemente in einem Recyclingstrom typischerweise geringer ist, ergibt sich ein reduziertes Trennproblem. Ein alternativer Ansatz zum klassischen rohstofflichen Recycling von Permanentmagneten ist das werkstoffliche Recycling, bei dem versucht wird, Neodym-Eisen-Bor-Legierungen als Ganzes zurückzugewinnen und für die Herstellung neuer Magnete zur Verfügung zu stellen.

3.22.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Neben technologieorientierten Forschungen zur Effizienzsteigerung sowie der Materialsubstitution von SE-Metallen besteht für die großtechnische Gewinnung aus der Vielzahl von Mineralen und Vorkommen, in denen Seltene Erden vorliegen, Forschungsbedarf, um die Förderung an Standorten außerhalb Chinas zu ermöglichen und vor allem besonders kritische Elemente der Seltenerdmetalle verfügbar zu machen. Für die Gewinnung von Primärrohstoffen in Deutschland werden unter anderem die Förderung von Mineralien aus großen Tiefen und die Aufbereitung sehr fein verwachsener Erze als Herausforderungen angesehen. Darüber hinaus ist die Flotation der oxydischen und carbonatitischen SE-Erze ein Flaschenhals in der Aufbereitungstechnik, hier werden sowohl verbesserte oder vollständig neue Flotationsregime benötigt.

Das Recycling von SE spielt derzeit (noch) keine Rolle in technischem Maßstab, wenn auch in ausgewählten Bereichen (Hochleistungsbatterien und -magnete) bereits einige Forschungsvorhaben zur Verfahrensentwicklung abgeschlossen werden konnten. Aussichtsreich erscheinen auch Ansätze zur Verwertung von SE aus Schlacken und anderen Nebenprodukten der Metallgewinnung, -verarbeitung und des Recycling, die auch für Ablagerungen (Halden) geeignet und sinnvoll anwendbar sein können.

Mit Blick auf die Gewinnung von Sekundärrohstoffen sorgen wie bei den Edelmetallen die geringen Konzentrationen und die hohe Integration von Komponenten v.a. in elektronischen Anwendungen für große Schwierigkeiten bei der Rückgewinnung von Seltenerdmetallen. Gerade Aspekte der Miniaturisierung und Funktionalisierung z.B. durch dünne Schichten sind aus Sicht der Rückgewinnung wenig vorteilhaft. Ansätze ergäben sich hier neben der Technologieentwicklung zur Rückgewinnung niedrig konzentrierter Wertstoffe, die auch für ärmere Erze im Primärbereich Einsatz finden könnten, auch in der Entwicklung neuer Nutzungs- und Eigentumsmodelle von Produkten bzw. der darin enthaltenen Wertmetalle in Verbindung mit Re-Design-Überlegungen („Materialleasing“). Eine weitere Herausforderung ist die Gewährleistung der Bauteilperformanz bei der Verwendung von rezyklierten Seltene Erden vor allem bei Permanentmagneten. Weil Seltenerdmetalle in vielen zukunftsweisenden Technologien zum Einsatz kommen und vor allem Europa derzeit über keine eigenen Rohstoffquellen verfügt, besteht großer Handlungsbedarf besonders bei der Rückgewinnung aus Altprodukten, deren Rate derzeit noch unter einem Prozent liegt. Hierbei stellen auch die Kombinationen der

verwendeten Metalle eine Herausforderung dar, weil etwa in einem Gemisch von Edelmetallen und Seltenen Erden wie in Abgaskatalysatoren sich die eine Fraktion nur unter Verlusten der anderen Fraktion rückgewinnen lässt (Hagelücken 2014). Darüber hinaus ist es wichtig, bereits beim Design von Produkten (Design for Recycling) sowie bei der Beherrschung und Steuerung von Rückführlogistik anzusetzen: Die derzeitige Recyclingwirtschaft und -technologie ist auf die SE-Rückgewinnung nicht ausgerichtet.

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht bei der Substitution besonders kritischer Seltenerdmetalle für die Herstellung von funktionalen Werkstoffen, wie z.B. Magneten, durch alternative Materialien oder Anwendungen mit vergleichbaren Eigenschaften.

3.23. Silicium

3.23.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Mit einem Anteil von ca. 26% an der äußeren Erdkruste stellt Silicium das zweithäufigste Element auf der Welt dar. Silicium ist ein hartes, sprödes, dunkelgrau-glänzendes Nichtmetall mit diamantähnlicher Gitterstruktur. Aufgrund der Materialeigenschaften sind sowohl die elementaren Formen als auch dessen chemische Verbindungen von hoher industrieller Bedeutung.

Von der Europäischen Union wird Silicium als leicht kritisches Element eingestuft. Dies wird mit einem geringen Versorgungsrisiko und einer hohen Vulnerabilität begründet. Als unkritisch sind in diesem Kontext die vorhandenen Reserven anzusehen sowie der Ausbau der Produktion von Silicium. Als kritisch ist hingegen der Produktionsländerindex zu betrachten, der durch einen hohen Anteil von China bestimmt wird. Damit verbunden sind Handels hemmnisse und die aktuell geringe Recyclingrate sowie das starke Nachfragewachstum von Silicium. Dies liegt begründet in den vielen Anwendungsbereichen, welche in den letzten Jahren ebenfalls stark an Bedeutung gewonnen haben. In hochreiner kristalliner Form kommt Silicium überwiegend in der Photovoltaik (PV)-Industrie, der Halbleiterindustrie und Mikroelektronik zur Herstellung von Computerchips, Dioden oder Transistoren zum Einsatz. Zusätzliche Anwendungsfelder liegen in der Glas-, Schleifmittel-, Poliermittel- und Legierungsstahlproduktion sowie in medizinischen Anwendungen.

Schätzungen auf Basis von Technologie-Trendentwicklungen und Energieversorgungszenarien gehen davon aus,

dass Silicium auch zukünftig große Anwendung finden wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Halbleiterbereich ein sehr hoher Reinheitsgrad notwendig ist (s. Abschnitt Gewinnungstechnologien), der aktuell ausschließlich mit einem erheblichen Energieaufwand zu erreichen ist.

3.23.2. Vorkommen

Insgesamt entfallen auf Silicium etwa 15% der Erdmasse. Aufgrund seiner hohen Affinität zu Sauerstoff liegt es nicht elementar, sondern in oxidischer Form, beispielsweise als Quarz (kristallines SiO_2) vor. Enthält dieser gewisse Mengen an anderen Komponenten, kann er beispielsweise als Schmucksteine begehrt sein. Mit Metallen bildet Silicium Silicate, die je nach Kondensationsgrad in Insel-, Gruppen-, Ring-, Ketten-, Band-, Schicht- und Gerüstsilicate unterschieden werden und in der Natur als Hauptbestandteile von Mineralen wie Glimmer, Asbest, Ton, Schiefer und Feldspat vorkommen.

Neben den oben genannten, polymeren Ressourcen ist Silicium in den Weltmeeren in der monomeren Form – der Kieselsäure – in beträchtlichen Mengen gelöst und vorhanden. Eine Vielzahl an Lebewesen (z.B. Algen, Schwämme, diverse Pflanzen) bildet daraus skelettartige Strukturen aus polymerer Kieselsäure (Silica) aus.

3.23.3. Gewinnungstechnologien

Silicium wird vor allem in drei verschiedenen Reinheitsgraden gewonnen:

- » Ferrosilicium (vor allem für die Stahlindustrie) mit bis zu 95% Si
- » Technisches (metallurgisches) Silicium mit einer Reinheit bis zu 99,5%
- » Reinstsilicium mit einer Reinheit von mehr als 99,9999%

Ferrosilicium und technisches Silicium werden mittels carbothermischer Reduktion durch Umsetzung von Quarzen mit Koks im Lichtbogenofen erzeugt. Dabei differieren die eingesetzten Quarztypen durch den Si-Gehalt, d.h. beim Ferrosilicium $>96\%$ Si und beim technischen $>98\%$ Si. Mit dessen Herstellung ist ein hoher Energieverbrauch von 12 MWh/t verbunden, der aus den zu erreichenden Temperaturen von mehr als 2.000 °C resultiert.

Aufgrund der energieintensiven Herstellungsweise konzentrieren sich die Produktionsanlagen auf Standorte, an denen preiswerter Strom aus Wasserkraft zur Verfügung

steht. Aktuell hält die Volksrepublik China einen Weltmarktanteil von ca. 62%, Norwegen stellt mit 8,3% den zweitgrößten Produzenten dar, gefolgt von Brasilien mit 5,5%. Im Jahr 2014 belief sich die weltweite Produktion von Silicium auf geschätzte 7,68 Mio. Tonnen.

Reinstsilicium wird in der Regel nach dem Siemensverfahren durch Pyrolyse von SiHCl_3 , das zuvor aus technischem Silicium synthetisiert wird, hergestellt. Dabei wird das Reinstsilicium bei 1.100°C an hochreinen Siliciumstäben abgeschieden. Alternativ dazu wird ein Prozess auf Basis von Silan (SiH_4) verwendet, das sich an vorgelegten Si-Keimen in einem Wirbelschichtreaktor bei 800°C zu Reinstsilicium und Wasserstoff zersetzen lässt. Weitere Aufbereitungsmaßnahmen sind zudem erforderlich, um hochreines, einkristallines Silicium (z.B. über das Czochralski-Verfahren) für die Verwendung in der Mikroelektronik zu gewinnen. Für das Jahr 2015 wird eine Produktionsmenge von insgesamt 400.000 t an Reinstsilicium erwartet.

3.23.4. Recycling

Aktuell fallen nur geringe Abfallmengen an PV-Modulen an, jedoch wird in den kommenden Jahren mit einer erheblichen Steigerung dieser Abfallrate gerechnet. Diese

Tatsache muss Forschung und Industrie zu intensiven Entwicklungen und Verfahren des effizienten Recyclings bewegen. Mit der neuen WEEE-Richtlinie sind PV-Produzenten verpflichtet, Module zurückzunehmen und zu recyceln, was ebenfalls die Sammelquote positiv beeinflussen wird.

Im Bereich des PV-Modul-Recyclings existieren bereits Verfahren, die im großtechnischen Maßstab Anwendung finden. Für die Rückgewinnung von Silicium werden die Module in einem Ofen bei 600°C einem thermischen Prozess unterzogen, um Kunststoffe zu verbrennen und Verbundstoffe zu lösen. Im Anschluss erfolgt durch einen mechanischen Prozess eine Materialtrennung nach Glas, Silicium und Metallen. Von dem gewonnenen Silicium werden die Oberflächenschichten, unter anderem Silber, durch chemische Reinigungsschritte – das so genannte „Ätzen“ – getrennt. Im Anschluss daran kann das Silicium als Rohstoff in den Kristallisationsprozessen der Waferherstellung wiederverwertet werden. Dieses Recycling kann kostengünstiger als die Neuproduktion eines Wafers sein und spart zudem ca. 80% der dazu benötigten Primärenergie ein. Aktuelle Forschungen untersuchen neue Recyclingprozesse zur Realisierung von handelsüblichen Waferdicken von etwa $160\text{--}200\ \mu\text{m}$.



Siebdruck-Silicium-Solarzelle (Foto: SolarWorld AG)

Es gibt Recyclingkonzepte für die Rückgewinnung aus Sägeslurry und Sägesuspensionen der Waferproduktion mittels Schmelzverfahren. Sie befinden sich derzeit in der technischen Entwicklung. Hierbei wird das vorhandene Silicium bei Temperaturen von ca. 1.410 °C aufgeschmolzen. Im Anschluss daran können durch ein definiertes Separationsverfahren Fremdstoffe isoliert werden. Inwieweit sich der hohe Energiebedarf bzw. die erzielbaren Reinheiten als Fallstricke erweisen, ist noch offen. Alternativ dazu existiert ein Ansatz, aus Siliciumabfällen (EoL und Produktion) Dichlordimethylsilan herzustellen, das wiederum Vorstufe für Silikone ist. Auf diese Weise wird das Problem der Energieintensität genauso umgangen wie das der Recyclingproduktreinheit.

3.23.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Obwohl Silicium quasi als unbegrenzter Rohstoff auf der Erde verfügbar ist, besteht die Herausforderung in einer deutlichen Steigerung der Gewinnungseffizienz. Der resultierende Reinheitsgrad ist dabei maßgebliches Kriterium der Technologieentwicklung. Treibende Kraft der Nachfrage ist der stark wachsende Anwendungsbereich im Sektor der Erneuerbaren Energien wie beispielsweise der Photovoltaik. Aktuelle Betrachtungen bzgl. des Energieverbrauchs, der prozessbedingten Entstehung von Treibhausgasen und umweltschädlicher Chlorverbindungen lässt die Ökobilanz zur Herstellung von hochreinem Silicium negativ ausfallen. Gleichzeitig ist dies mit hohen Produktionskosten verbunden, die einen großen Anteil an den Kosten der Endprodukte ausmachen.

Es ist festzuhalten, dass Silicium eine ökonomisch bedeutende Ressource für zahlreiche industrielle Anwendungen ist. Die größte Herausforderung liegt in der effizienten Gewinnung im Hinblick auf die technische, ökonomische sowie ökologische Handhabung. Weiterhin sind existierende Forschungs- und Entwicklungspotenziale im Bereich der Recyclingtechnologie zu erörtern und weiterzuentwickeln. Dies wird in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen müssen.

3.24. Wolfram

3.24.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Wolfram, ein chemisches Element der 6. Nebengruppe, ist ein weißglänzendes Schwermetall mit sehr hohem Schmelz- (3.422 °C) und Siedepunkt (5.930 °C). Bedingt durch die hohe Dichte und Härte (ähnlich wie Diamant)

sowie die gute elektrische Leitfähigkeit findet Wolfram in thermisch, chemisch und mechanisch anspruchsvollen Bereichen Anwendung. Etwa 60% der Weltproduktion wird zu Wolframkarbid verarbeitet, das als Hartmetallpulver unersetzlich für die Werkzeugherstellung ist. Nahezu alle Bohr-, Fräs- und Schneidwerkzeuge werden mit Hartmetalleinsätzen aus Wolframkarbid bestückt. Wegen der hohen thermischen Beständigkeit wird Wolfram als Glühwendel in Glühlampen oder als Elektrode bei speziellen Schweißverfahren verwendet. Zusätzlich gilt Wolfram als ökologisch unbedenklich. Wegen der Marktbeherrschung Chinas und möglichen Versorgungsempässen kategorisierte die EU im Jahr 2014 Wolfram als „kritischen Rohstoff“. Bis 2020 wird das jährliche Wachstum des Rohstoffbedarfs auf 3–5% geschätzt. Der Rohstoffpreis liegt im Bereich 350–400 USD pro metric ton unit (1 mtu = 10 kg WO₃), was umgerechnet 44.000–50.000 USD pro Tonne Wolfram im Ammoniumparawolframat (APW) entspricht.

3.24.2. Vorkommen

Wolfram ist ein relativ seltenes Element in der Erdkruste und existiert nicht in reiner, metallischer Form, sondern vielmehr in 45 Mineralen, wobei nur Wolframit (Mn, Fe) WO₄ und Scheelit CaWO₄ von wirtschaftlichem Interesse sind. Die Weltproduktion reinen Wolframs betrug im Jahr 2013 71.000 Tonnen, wobei China mit über 80% die höchsten Fördermengen beisteuerte. Größere Lagerstätten findet man noch in Russland, Kasachstan, der Mongolei und Vietnam, aber auch in Bolivien und Peru, sowie Kanada, USA, Australien und auch Österreich. Ein Mindestgehalt von 0,1–2,5% WO₃ ist notwendig, um die Erze wirtschaftlich auf einen Gehalt von 65–75% aufarbeiten zu können. Neben Wolframerzen wird heutzutage ca. 30% Altmetall als sekundäre Rohstoffquelle recycelt.

3.24.3. Gewinnungstechnologien

Je nach Ausgangsmaterial und gewünschter Reinheit werden neben verschiedenen mechanischen (z.B. Sedimentation, Flotation), elektrostatischen und magnetischen auch insbesondere thermische Trennverfahren (Pyro- und Hydrometallurgie) zur Aufarbeitung bzw. Aufkonzentrierung verwendet. Nach der Erzlaugung muss das wässrige Mehrstoffgemisch durch verschiedene Methoden, wie Fällung, Extraktion, Adsorption oder Ultrafiltration sukzessive getrennt werden, um so zu hochreinen Wertstoffen zu gelangen. Bei der Flüssig/Flüssig-Extraktion werden Ionentauscher (zumeist tertiäre Amine) eingesetzt, um so das Wolfram selektiv aus der sauren oder basischen Laugungslösung zu extrahieren. Die Rückextraktion erfolgt

mit Ammoniak, wodurch wieder das Zwischenprodukt APW gewonnen wird. Dieses wird dann zu Wolframtrioxid umgesetzt, welches bei 800 °C mit Wasserstoff zu elementarem Wolfram reduziert wird.

3.24.4. Recycling

Die Rückführung wolframhaltiger Reststoffe in den Produktionskreislauf ist vergleichsweise sehr gut ausgeprägt, da die Anfallstellen zum einen überwiegend im gewerblichen Bereich liegen, und andererseits der hohe Wert des Metalls einen Erlös verspricht.

Hauptsächlich auftretende wolframhaltige Stoffströme sind:

- » Hartmetallschrotte und Cermet-Schrotte (Keramik-Metall-Verbindungen)
- » Schwermetallschrotte (Wolfram in Legierungen ohne karbidischen Anteil)
- » Schleifschlämme aus allen Branchen der Metallbearbeitung
- » Wolfram-Kupfer-Legierungen aus der Elektrotechnik
- » Rückstände aus dem Recycling von Superlegierungen

Die eingesetzten Verfahren zum Recycling sind vielfältig und reichen vom manuellen Nachschleifen gebrauchter Hartmetallschneiden (in China) bis zu mehrstufigen und länderübergreifend durchgeführten Prozessketten aus pyro- und hydrometallurgischen Verfahren.

Wolframschrotte sind weltweit gehandelte Ware. Dank entsprechender Preisgestaltung sind chinesische Händler in der Lage, sich in Europa mit Sekundärrohstoffen einzudecken, die in China kostengünstiger als in Europa umgearbeitet werden. Hier zeigt sich, dass die Rohstoffquelle „Recycling“ keineswegs ein „Heimspiel“ ist, solange es offene Märkte gibt.

Die höchsten Anforderungen an die Verfahrenstechnik stellt der Stoffstrom der Rückstände aus dem Recycling von Superlegierungen. Meist handelt es sich um hochwertige Nickel-basierte Legierungen mit Rhenium, Wolfram, Tantal, Titan, Kobalt, Chrom und Hafnium. Der Zugang zu den Anfallstellen dieser Schrotte ist relativ hart umkämpft. Es gibt keine Transparenz hinsichtlich der eingesetzten Verfahren. Die Bewertung des Metallinhalts gibt den Ausschlag dafür, an welchen Anbieter die Schrotte gehen.

Der Import von Wolframschrotten in die EU ist im Rahmen des Abfallrechts reglementiert: da es sich bei Kobalt und Nickel um gefährliche Inhaltsstoffe handelt, muss das ausführliche Notifizierungsverfahren durchlaufen werden. Im Inland wird gerade an der Verschärfung von Grenzwerten (Staub) gearbeitet, welche für die betroffenen Betriebe zu erheblichen Mehraufwendungen führen werden.

3.24.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die bisherigen Trennverfahren müssen optimiert (z.B. effizientere Ionentauscher, Apparate) bzw. kombiniert werden als hybride Verfahren, um so den neuen Anforderungen, z. B. niedrig konzentrierte Prozessströme oder effizientes Recycling von Metalllegierungen, gerecht zu werden. Im Vergleich zu Wolframerzen hat Altmetall im Schnitt einen höheren Wolframgehalt, weshalb das Recycling eine wichtige sekundäre Rohstoffquelle darstellt, besonders auch im Hinblick auf die Unabhängigkeit von Importen. Als Substitutionsmetalle kommen Molybdän oder Titan in Frage, wodurch aber ein Performanceverlust oder höhere Kosten auftreten. Die gestiegenen Marktpreise setzen einen größeren Anreiz zur Forschung und Entwicklung im Bereich des Recyclings und zur Errichtung neuer Minen, die bisher noch keinen wirtschaftlichen Abbau gewährleisten konnten. Dennoch ist der Wolframmarkt nahezu im Gleichgewicht, es herrscht zurzeit ein geringes Überangebot, das sich aber bedingt durch die erwartete Nachfrageentwicklung bis 2020 regulieren wird.

Durch die einzigartigen Eigenschaften des Wolframs ist dies ein ökonomisch bedeutender Rohstoff für zahlreiche industrielle Anwendungen. Wegen der Endlichkeit der global verfügbaren Ressourcen rückt das Recycling in der Kreislaufwirtschaft im Sinne der Nachhaltigkeit in den Fokus. Vorhandene Aufbereitungsverfahren müssen optimiert bzw. kombiniert werden, um den neuen Herausforderungen gerecht zu werden. Dies bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte und Anreize, die Trenneffizienz sowie die Recyclingquote zu steigern.

3.25. Zink

3.25.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Das bläulich-weiße Metall Zink wird mit 36% für die Verzinkung von Stahl, beispielsweise in der Bau- und Automobilindustrie als Korrosionsschutz, verwendet. Zink bildet an feuchter Luft eine dünne Zinkoxidschicht aus, die

als physikalische Schutzschicht dient und das Metall darunter schützt. Ein PKW enthält laut der International Zinc Association (IZA) durchschnittlich 10,3 kg Zink, wovon 3 kg im Korrosionsschutz, 4,9 kg in Zinkdruckgussbauteilen und der Rest in Reifengummi, Auswuchtgewichten oder Farben vorkommen (Initiative Zink 2015). Rund 27% des Zinks werden in Form von Messing weiterverarbeitet. Weitere 25% werden als Halbzeuge beispielsweise als Bleche, Drähte, Bänder oder weitere Zinkgusslegierungen genutzt. In Form von Zinkverbindungen kommen u.a. Zinkoxid, Zinkpulver und Zinkstaub in der chemischen Industrie zum Einsatz, welche einem Anteil von rund 11% entsprechen. Im chemischen Sektor findet das Element als Stabilisator in Kunststoffen, zur Verbesserung der Eigenschaften in der Textil- und Kunstfaserindustrie oder zur Erhöhung der Wetterbeständigkeit und des Korrosionsschutzes in Farben und Lacken Anwendung. Auch in der Arzneimittel- und Kosmetikindustrie sowie Tierernährung wird das lebensnotwendige Spurenelement eingesetzt.

Weltweit wurden im Jahr 2014 13,8 Mio. t Zink verwendet, wovon 2,1 Mio. t in Europa erzeugt wurden (WVM 2015).

3.25.2. Vorkommen

In der Erdkruste kommt Zink mit einem durchschnittlichen Gehalt von 70 ppm vor. Zink ist damit eines der am häufigsten vorkommenden Elemente in der Erdkruste (Initiative Zink 2015). Das wichtigste Mineral in der primären Gewinnung ist die Zinkblende (ZnS, Sphalerit). Rund 95% der Zinkförderung stammen aus ZnS. Zinkblende tritt in der Regel vergesellschaftet mit Blei auf. Der Abbau von Zink findet vorwiegend im Tiefbau statt. Etwa 10% der Zinkproduktion stammen aus dem Tagebau.

Die Minenproduktion belief sich im Jahr 2014 auf 13,3 Mio. t, wovon rund 37% aus China, 14% aus Peru und 11% aus Australien stammen. Daneben sind die USA (6%), Indien (5%), Mexiko (5%), sowie Bolivien, Kanada, Irland und Kasachstan mit Anteilen zwischen 2–3% an der Minenproduktion beteiligt. Die weltweiten, bekannten Reserven belaufen sich auf 230 Mio. t. Der Großteil der Reserven verteilt sich derzeit auf die Länder Australien, China und Peru (USGS 2015).

3.25.3. Gewinnungstechnologien

Damit ein reines Konzentrat gewonnen werden kann, wird das Roherz aufgemahlen. Darauf folgend werden mittels Flotation Erze und Gangart getrennt. Je nach Typ der Lagerstätte enthält das Material Blei, Kupfer, Eisen,

Cadmium, Silber sowie Schwefel. Der Zinkgehalt des Zinkkonzentrats schwankt zwischen 45 und 60%. Gleichzeitig liegt der Schwefelgehalt zwischen 25 und 30%.

Durch die Flotation werden Blei und Zink nicht vollständig voneinander getrennt, sodass im ersten Schritt ein Blei-Zink-Gemisch entsteht. Oxidische Erze werden durch Wälzrohrtechnik angereichert, da in diesem Fall eine Flotation nicht möglich ist.

Nach der Flotation wird das Konzentrat geröstet, wodurch Schwefel abgetrennt wird und Schwefelsäure als Nebenprodukt gewonnen werden kann. Die Zinkelektrolyse ist das übliche Verfahren der Zinkgewinnung, wodurch rund 90% des Zinks hergestellt werden. Dabei wird Zink durch Laugung in Schwefelsäure während der Elektrolyse an einer Kathode abgeschieden, sodass ein hoher Reinheitsgrad erreicht werden kann. Innerhalb der Raffination werden auch sekundäre Materialien, wie Altschrotte, eingesetzt (Dorner 2014).

3.25.4. Recycling

In den letzten Jahrzehnten haben sich ausgereifte Verfahren zum Recycling entwickelt, da Zink eine hohe Rezyklierbarkeit ohne Qualitätsverlust aufweist (Dorner 2014). Als Hauptquelle werden Zinkbleche, verzinkter Stahl, Messing und Zinkdruckguss für die Rückgewinnung genutzt (Grund 2015). Des Weiteren werden als Sekundärrohstoff zinkhaltige Materialien (z. B. Zinkasche, Hartzink, zinkhaltige Stäube) verwendet. Der Recyclingprozess von Zink verbraucht nur ein Zwanzigstel der Energie der Primärproduktion und ist somit aus energietechnischer und ökologischer Perspektive als sehr positiv zu bewerten (Grund 2015).

Das Recycling von Zink findet in Produktions- sowie Anwendungsstufen statt. Hierfür wird je nach Prozess das Recyclingmaterial eingeschmolzen oder dem Raffinationsprozess zugeführt (Dorner 2014). In den Prozessen wird nach Alt- und Neuschrotten differenziert. Bei Neuschrotten handelt es sich um industrielle Abfälle. Hingegen sind Altschrotte Produkte, die erst am Ende ihrer Nutzungsphase einem Recyclingprozess zugeführt werden.

In der Stahlindustrie werden Stahlschrotte mit Verzinkungsschicht eingeschmolzen. Durch die prozessbedingten, hohen Temperaturen verdampft das Zink und wird im Stahlwerksstaub abgeschieden, welcher einen Zinkgehalt zwischen 20 und 30% aufweist. Mittels pyrometallurgischem Wälzprozess wird dieser auf über 60% angerei-

chert und als Sekundärrohstoff in die Zinkindustrie zurückgeführt.

In der Messingindustrie werden die metallischen Zinkschrotte separat erfasst und eingeschmolzen, um diese anschließend zu Sekundärzink und Zinklegierungen zu verarbeiten. Für Rückstände aus der Zinkverarbeitung kommen spezielle Recyclingverfahren zum Einsatz, bei denen teilweise direkt Zinkoxid hergestellt wird (Initiative Zink 2015). Aktuell werden etwa 800.000 t recyceltes Zink weltweit in der sekundären Raffinationsproduktion hergestellt (Dorner 2014). Hingegen werden rund 3,5 Mio. t an Sekundärzink, beispielsweise Zinklegierungen und Zinkbleche, direkt eingeschmolzen. Ein Großteil dieses Recyclingmaterials stammt aus Elektroofenstäuben, da diese einen Zinkanteil von bis zu 24% aufweisen (Piret 2012).

Das Recyceln von Zink hat sich etabliert und wird in allen Anwendungsbereichen umgesetzt. Dennoch kann der Bedarf an Zink mit einem Verbrauch von 13,8 Mio. t nicht allein durch die Recyclingtechnologie gedeckt werden.

3.25.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die End-of-Life-Recyclingrate von Zink liegt anwendungsspezifisch bei bis zu 95%. Die Herausforderung liegt in der Optimierung der Wertstoffkreisläufe bzw. der Sammelsysteme, um ein Recycling zu realisieren. Dies sollte europaweit ausgebaut werden, um eine langfristige Ressourcenschonung zu unterstützen (Grund 2015).

3.26. Zinn

3.26.1. Wirtschaftliche Bedeutung

Die Hauptanwendungsgebiete des silberweißen und sehr weichen Schwermetalls Zinn haben sich gewandelt. Während vor einigen Jahrzehnten die Nachfrage im industriellen Bereich hauptsächlich aus der Verzinnung von Weißblech bestand, liegt das heutige Hauptanwendungsgebiet, mit einem Anteil von 52%, im Bereich der Lote. Lötzinn wird im Hausinstallationsbereich, aber vorwiegend in der Elektro- und Elektronikindustrie angewendet. Im Elektronikbereich findet es, aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes von 231,93°C, bspw. Anwendung zum Verbinden und Befestigen von Bauteilen auf Leiterplatten. Angestiegen ist die Nutzung von Lötzinn noch einmal im Jahr 2006 durch den in der EU gesetzlich geforderten Ersatz bleihaltiger Lote.

Heute werden weltweit rund 18% des Zinns als Korrosionsschutz in der Weißblechproduktion verwendet. Grund ist der hohe Widerstand gegen Chemikalien und die Lebensmitteltauglichkeit. Neben Verpackungsmaterial sind weitere Weißblechanwendungen bspw. Anschlüsse, Batteriekontakte und -gehäuse sowie Abschirmgehäuse in der Elektronik. Ein weiteres Einsatzgebiet von anorganischen sowie organischen Zinnverbindungen mit einem Anteil von 15% bildet die chemische Industrie, beispielsweise in Form von Katalysatoren für die Polyurethanherstellung (PU) oder als Stabilisator in Polyvinylchlorid (PVC) sowie als Flammenschutzmittel. Der Einsatz in Bronze oder Messing nimmt mit 5% einen kleinen Anteil ein. Rund 2% des Zinnbedarfs werden derzeit für die Floatglasherstellung verwendet. Durch die Dotierung mit Zinn wird eine sehr glatte Oberfläche erzeugt. Eine weitere Anwendung in der Glasindustrie ist in Form von Indium-Zinnoxid in LCDs sowie in Low-E-Glas gegeben. In anderen Anwendungsgebieten werden insgesamt 8% eingesetzt, das sind beispielsweise hochreine Zinn-Einkristalle in elektronischen Bauteilen, zinnorganischen Verbindungen (Fungizide) in der Landwirtschaft, in human- und veterinärmedizinischen Produkten sowie keramische Pigmente. Insgesamt lag die raffinierte Zinn-Menge im Jahr 2012 bei 337.500 t, wovon 21.000 t in Deutschland nachgefragt wurden.

3.26.2. Vorkommen

Der Zinnanteil der Erdkruste beträgt 2–3 ppm und ist damit so häufig wie die Elemente Yttrium und Cer. Kassiterit (SnO_2) ist das wirtschaftlich und mengenmäßig wichtigste Mineral der Zinnengewinnung, dessen Zinngehalt bei 79% liegt. Rund 70 bis 80% der Förderung werden durch dieses Mineral abgedeckt. Daneben wird es aus sulfidischen Mineralen wie beispielsweise Stannit gewonnen oder aus Skarn-Lagerstätten abgebaut. Die Minenproduktion lag im Jahr 2013 bei 294.000 t. Mit rund 40% ist China das Hauptförderland, gefolgt von Indonesien (32%), Peru (8%), Bolivien (7%), Brasilien (4%), Australien (2%), Vietnam (2%) sowie kleineren Mengen, die aus Malaysia, Kongo, Ruanda, Thailand, Nigeria, Laos und Russland stammen. Die Reserven belaufen sich auf 4,8 Mio. t weltweit, wovon sich wiederum 31% in China befinden sowie 17% bzw. 15% in Indonesien und Brasilien.

3.26.3. Gewinnungstechnologien

Der Abbau und die Aufbereitung sind von der Erzart abhängig. Primärerze werden zunächst einer Sulfid-Flotation unterzogen, bevor eine Schwerkraft-Sortierung erfolgt. Vor einer Verhüttung findet eine Reinigung statt, wobei

Schwefel und Arsen durch Oxidationsröstung abgetrennt werden und Eisenminerale durch Magnetscheidung entfernt werden.

Die Verhüttung des Kassiterits mit Kohlenstoff findet durch thermische Reduktion zu metallischem Zinn statt. Erzkonzentrate oder Röstgut aus der Vorreinigung werden im Flamm-, Drehrohr- oder Elektroofen auf Rohzinn geschmolzen. Kassiteritseifen werden durch Dichtesortierung mit darauf folgender Magnetscheidung abgetrennt.

Die Erzeugung von Rohzinn aus reinen Seifenerzkonzentraten findet durch eine Zweiphasenreduktion im Ausmelt-Ofen statt. Für zinnarme Erzkonzentrate ist das Verhüttungsverfahren im Wassermantel- oder Volatilisationsofen relevant. Dadurch werden die üblichen mehrstufigen Röst-, Schmelz- und Verblaseverfahren vermieden. Sekundärrohstoffe werden in Elektroöfen oder Rotationskonvertern eingeschmolzen und zu Rohzinn konzentriert. Das Rohzinn selbst wird entweder trocken raffiniert oder es geht in die Raffinationselektrolyse.

3.26.4. Recycling

Das Recycling von Zinn innerhalb der Produktionsprozesse bei der Lotherstellung ist ausgeprägt. Anfallende Rückstände, wie Lötzinnkrätzen oder Lötpasten, werden aufgrund des hohen Preises in Gänze einem Recycling zugeführt. Hierbei werden bis zu 70% der Zinnlegierungen zurückgewonnen. Das Recycling von Weißblechen durch Entzinnung ist auf elektrolytischem Weg möglich, wird in Deutschland jedoch aus ökonomischen Gründen aktuell nicht mehr durchgeführt.

Die Rückgewinnung von Zinn aus Leiterplatten ist auf thermischem und auf chemischem Weg möglich. Das Kayser-Recycling System (KRS) stellt ein thermisches Verfahren dar, bei dem pyrometallurgisch aus traditionellen Recyclingstoffen (Rückstände, Legierungsschrotte) und auch modernen Materialien (Elektronikschrotte) neben Nickel, Blei und Zink auch Zinn zurückgewonnen wird. Zinn fällt im Prozess als Zinn-Blei-Schlacke an und wird in einem angeschlossenen Mischzinnofen zu einer neuen Zinn-Blei-Legierung verarbeitet.

Während Zinn aus Bronzen und Rotguss vollständig recycelt wird, ist die Rückgewinnung im Sektor Chemikalien aufgrund des dissipativen Einsatzes nur teilweise möglich. Laut des International Tin Research Institute (ITRI) liegt die Recyclingrate von Zinn über 30%.

3.26.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der Zinnverbrauch steigt derzeit jährlich um rund 1%. Gleichzeitig nimmt die Produktion, beispielsweise in Peru, ab. Dies wird die Substitutionsbemühungen aufgrund steigender Preise erhöhen und das Recycling wieder mehr in den Fokus stellen. Daher liegt der zentrale Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Weiterentwicklung des Recyclings. Besonderes Augenmerk liegt auf dem WEEE-Sektor, wobei in der Logistik der Sammlung das größte Verbesserungs- und Entwicklungspotenzial besteht.

4. Literaturverzeichnis

Herausforderungen und Möglichkeiten der Rohstoffgewinnung

- Critical Metals Handbook, First Edition, Edited by Gus Gunn, John Wiley & Sons, Ltd., 2014
- P.Kausch, M. Bertau, J. Gutzmer, J. Matschullat (Hrsg.) Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge, Springer Spektrum, 2014
- C. Hagelüken, Wasser und Abfall, 14.-19.04.2015
- C. Hagelüken, Metallische Werkstoffe im Kontext von Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, WING Konferenz, 28.04.2015
- N. Arndt, D. Bol, P. Christmann, C. Hagelüken O. Vidal, P. Weihed, ERA-MIN Research Agenda, 12 December 2013
- Kausch, P.; Bertau, M.; Gutzmer, J.; Matschullat, J. (Hrsg.), *Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-39703-5. <http://www.unep.org/annualreport/2014/en/chemicals-waste.html>, 2013
- VCI-Factbook 05: „Die Formel Ressourceneffizienz“, 2005

Aluminium

- M. Bertau, A. Müller, P. Fröhlich, M. Katzberg, Industrielle Anorganische Chemie, Wiley-VCH, Weinheim, 4. Aufl., 2013
- Statista, Aluminium-Dossier, 2015
- BGR, Aluminium / Bauxit, Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, 2013
- HYDRO Aluminium, environment and society, 2012

Antimon

- M. Schmidt: DERA (Hrsg.): DERA Rohstoffinformationen Nr. 18: Rohstoffrisikobewertung Antimon. Berlin, 2013
- T.E.Graedel u.a.: Recycling rates of metals: A status report. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2011
- Roskill: Study of the Antimony Market. London, 2011
- Roskill Information Services Ltd., Antimony: Global Industry Markets and Outlook. 11. Aufl. London, 2012
- U. Schwarz-Schampera: Antimony, in Gunn, Gus (Hg.): Critical Metals Handbook. Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK: John Wiley & Sons, 70–98, 2014

Beryllium

- www.beryllium.eu (April 2015)

Borate

- M. Bertau, A. Müller, P. Fröhlich, M. Katzberg, Industrielle Anorganische Chemie, 4. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, 2013
- USGS, MCS Boron, 2015, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/boron/myb1-2012-boron.pdf>, zuletzt abgerufen am 13.04.2015
- Europäische Kommission, REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU, Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, Brüssel, 2014
- Industrial Minerals, <http://www.indmin.com/>, zuletzt abgerufen am 13.04.2015
- ECHA – European Chemicals Agency; <http://echa.europa.eu/de/candidate-list-table> am 05.11.2015

Chrom

- Roskill – The Economics of Chromium, Eleventh Edition, 2009
- USGS: Minerals yearbook 2012 – Chromium, 2012
- USGS: Mineral Commodity Summaries - Chromium, January 2015
- Report on Critical Raw Materials for the EU - Critical Raw Materials Profiles, abgerufen 19.06.2015
- Edelmetalle inkl. Metalle der Platingruppe
- Dechema (Hrsg.): Positionspapier “Rohstoffbasis im Wandel”, Frankfurt, 2010
- C. Hagelüken: “Recycling of (critical) Metals.” In Critical Metals Handbook, 41-69. John Wiley & Sons, 2014
- G. Gunn: “Platinum-group metals”, In Critical Metals Handbook, 284-311. John Wiley & Sons, 2014
- H. Sitzmann, E. Schwab: „Gold“ IN Römpp Enzyklopädie Online, Thieme Verl., URL: <https://roempp.thieme.de/roempp4.o/do/data/RD-07-01627>, Stand: Januar 2011
- Winnacker Küchler, Chemische Technik, Band 6b (5. Aufl.), Kap. 9 Edelmetalle, 209-276, 2006
- C. Hagelüken, C. W Corti. „Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through ‘Design for Recycling’“. In Gold Bulletin 43 (3), 209-220, 2010
- C. Hagelüken: “Edelmetallrecycling – Status und Entwicklungen, In Sondermetalle und Edelmetalle, Heft 121 der GDMB Schriftenreihe, 163-178, 2010 (EU 2014) Europäische Kommission, The European Critical Raw Materials review, Brüssel 2014

4. LITERATURVERZEICHNIS

- U.S. Geological Survey, Platinum-group metals statistics 2014
- R.G. Cawthorn: The Platinum Group Element Deposits of the Bushveld Complex in South Africa. *Platinum Metals Review* 54(4), 205–215, 2010
- Blacksmith Institute. Filipino Gold Miner's Borax Revolution. URL: <http://www.blacksmithinstitute.org/newsletter/march-april-filipino-gold-miner-reveals-borax-secret-pakistan-s-pollution-problem.html> [Stand 2015-04-08], 2014
- Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, UNEP 2013

Eisen / Stahl

- UNO, World Mining Data, US Geological Survey Minerals Yearbook, Iron and Steel
- PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (PwC), Stahlmarkt 2014, Stahl 2025: Quo vadis?, 2014
- UNO, World Mining Data, US Geological Survey Minerals Yearbook, Iron Ore
- BIR, World Steel Recycling in Figures 2010-2014

Flussspat

- Europäische Kommission. The European Critical Raw Materials review. Brüssel. (http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf) abgerufen 20.05.2015, 2014
- USGS: Minerals yearbook – Fluorspar, 2013
- USGS: Mineral Commodity Summaries – Fluorspar, January 2015
- Report on Critical Raw Materials for the EU - Critical Raw Materials Profiles (http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-critical-material-profiles_en.pdf), abgerufen 20.05.2015

Gallium

- Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU - CRITICAL RAW MATERIALS PROFILES, Mai 2014 Greber, 2000
- Gallium and Gallium Compounds; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Indium Corporation, 2010
- Zhao et al., Indium, Gallium & Germanium. Supply and Price Outlook, 2012
- Recovery of gallium from Bayer liquor: A review. *Hydrometallurgy* 125-126 (2012) 115-124 Indium Corporation, 2011
- Sustainability of Indium and Gallium In the Face of Emerging Markets. USGS, 2013
- Minerals Yearbook 2011, Gallium USGS, 2013
- Mineral Commodity Summaries 2013, Gallium Eurostat-Comext Database CN 8112 9289 [accessed July 2013] Roskill, 2011
- Gallium: Global Industry Markets and Outlook, 8th Edition 5N Plus, 2011
- 5N Plus and Rio Tinto Alcan in Discussions Regarding Development of New Primary Gallium Source Secor, 2012
- Orbite: A Strategic Gallium Producer. http://www.orbitaluminae.com/media/upload/filings/Gallium_Version_1_1.pdf [Accessed Feb 2013] Semiconductor Today, 2010
- New demand puts tension into gallium/indium supply Roskill Information Services for 2013 CRM study

Germanium

- J. Scoyer, H. Guislain, and H. U Wolf, Germanium and Germanium Compounds. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2000
- R. Moskalyk, Review of germanium processing worldwide. *Minerals Engineering* 17, 3, 393–402, 2004
- G.S. Pokrovski and J. Schott, Thermodynamic properties of aqueous Ge(IV) hydroxide complexes from 25 to 350°C: implications for the behavior of germanium and the Ge/Si ratio in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 9, 1631–1642, 1998
- L. R. Bernstein, Germanium geochemistry and mineralogy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2409–2422, 1985
- M. Kul and Y. Topkaya, Recovery of germanium and other valuable metals from zinc plant residues. *Hydrometallurgy* 92, 3-4, 87–94, 2008
- N. Felix, Indium and Indium Compounds. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2000
- R. Höll, M. Kling, and E. Schroll, Metallogenesis of germanium—A review. *Ore Geology Reviews* 30, 3-4, 145–180, 2007
- European Commission: Critical raw materials for the EU. Report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials. 2010

Graphit

- gk-graphite.com – abgerufen am 06.05.2015; asbury.com – abgerufen am 06.05.2015
- Roskill Natural & Synthetic Graphite: Global Industry Markets and Outlook Eighth Edition, 2012
- verschiedene Unternehmenspräsentationen z.B. Focus Graphite; Northern Graphite; Syrah Resources; Triton Minerals etc.

Indium

- A. Alfantazi, and R. Moskalyk., Processing of indium: a review. *Minerals Engineering* 16, 8, 687–694, 2003
- U. Schwarz-Schampera and P. Herzig, Indium. *Geology, Mineralogy and Economics*. Springer, Berlin Heidelberg, 2002
- European Commission: Critical raw materials for the EU. Report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials, 2010
- Recycling critical raw materials, Oeko-Institut e.V. Freiburg, 2012

4. LITERATURVERZEICHNIS

- Umicore Precious metal refining. <https://www.serdc.org/Resources/Documents/Summit%20Presentations/SERDC%20Summit%20Presentation%20-%20Mark%20Caffarey.pdf>
- BHMZ-Bio-Hydro-Metallurgisches Zentrum, TU-Bergakademie Freiberg, <http://tu-freiberg.de/forschung/bhmz>

Kalialz

- www.fao.gov Juni 2015
- R. Dittmeyer, W. Keim, G. Kreysa, A. Oberholz (Hrsg.) Winnacker-Küchler: Chemische Technik, 5. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, 2006
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, 2011
- S.M. Jasinski, USGS, Mineral Commodity Summaries, Potash, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/potash/mcs-2015-potas.pdf> Juni 2015
- S.M. Jasinski, USGS, 2012 Minerals Yearbook, Potash, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/potash/myb1-2012-potas.pdf> Juni 2015
- S.M. Jasinski, USGS, Mineral Industry Surveys, Marketable Phosphate Rock and Potash – Crop Year 2014, http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mis-2014cy-phosp-potas.pdf Juni 2015

Kobalt

- <http://www.thecdi.com> accessed at 7.7.2015
- J. D. Donaldson, S. M. Grimes, S. J. Clark: Cobalt in Chemicals, The Cobalt Development Institute, Guildford 1986
- J. D. Donaldson, S. J. Clark: "Cobalt in Superalloys," The Monograph Series Cobalt Development Institute, London 1985
- J. D. Donaldson, S. J. Clark, S. M. Grimes: Cobalt in Electronic Technology, The Cobalt Development Institute, Guildford 1998
- J. D. Donaldson, S. J. Clark, S. M. Grimes: Cobalt in Medicine, Agriculture and the Environment, The Cobalt Development Institute, Guildford 1986
- J. D. Donaldson, S. J. Clark, S. M. Grimes: Cobalt in Batteries, The Cobalt Development Institute, Guildford 2000
- J.D. Donaldson, D. Beyersmann: Cobalt and Cobalt Compounds, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Online ISBN: 9783527306732
- L.S. Renzoni, W.V. Barker: Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt, Interscience Publishers, New York, Seite 535-545, 1961
- N.L. Piret :JOM, 50(10), Seite 42-43,1998
- Hawkins M.J., JOM, 50(10), Seite 46 -50, 1998
- D.P Mantuano, G. Dorella, R.C.A. Elias, M.B Mansur: Analysis of a hydrometallurgical route to recover base metals from spent rechargeable batteries by liquid-liquid extraction with Cyanex 272, Journal of Power Sources,159(2):1510 – 1518, 2006
- R.S. Juang, Y.T. Chang: Kinetics and mechanism for Copper(II) extraction from sulfate solutions with bis(2-ethylhexyl)phosphoric acid, Industrial & Engineering Chemistry Research, Jan; 32(1):207–213, 1993
- Z.R. Llanos, W.G. Deering: Recycling of Metals and Engineered Materials, The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), Seite. 759–771, 2000
- H. Kramer, K. Eckert: Proceedings of the European Metallurgical Conference (EMC) , Vol. 3, Seite 1021– 1024, 2005
- Abschlussbericht des Forschungsprojektes LithoRec, 2011
- C. Hanisch, W. Haselrieder, A. Kwade: Recovery of active materials from spent lithium-ion electrodes and electrode production rejects in: J. Hesselbach, C. Herrmann (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, ISBN: 978-3-642-19692-8, S. 85-89, 2011
- J.S Preston., Solvent extraction of cobalt and nickel by organophosphorous acids, Hydrometallurgy, 9, Seite 115-133, 1982
- R. Grimm, Z. Kolarik: Acidic organophosphorous extractants-XIX, J. inorg.nucl.Chem., 36, Seite 189-192, 1974
- R. Grimm, Z. Kolarik: Acidic organophosphorous extractants-XXV, J. inorg.nucl.Chem., 38, Seite 1493-1500, 1976
- R. Grimm, Z. Kolarik: Acidic organophosphorous extractants-XXIV, J. inorg.nucl.Chem., 38, Seite 1721-727, 1976
- J.S. Preston: Solvent extraction of nickel and cobalt by mixtures of carboxylic acids and non-chelating oximes, Hydrometallurgy, 11, Seite 105-124, 1983
- B.K. Tait: Cobalt-nickel separation: the extraction of cobalt(II) and nickel (II) by Cyanex 301, Cyanex 302 and Cyanex 272, Hydrometallurgy, 32, Seite 365-372, 1993
- Report on critical raw materials for the EU, report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, May 2014, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm accessed at 07.07.2015
- GRS Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien, Die Welt der Batterien, 2007, www.grs-batterien.de
- <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/cobalt/all/>, Juli 2015

Kokskohle

- International Energy Agency: Coal Information 2014, OECD/IEA (ISBN 978-92-64-21704-1), Paris 2014
- European Commission, Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials: Report on critical raw materials for the EU, Brüssel 2014
- Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2009, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2009
- J. Schmalfeld (Herausgeber): Die Veredlung und Umwandlung von Kohle, Technologien und Projekte 1970 bis 2000, DGMK 2009 (ISBN 978-3-936418-88-0)

4. LITERATURVERZEICHNIS

- M. Farrenkopf (Herausgeber): Koks, Die Geschichte eines Wertstoffes, Band 1 und 2, Selbstverlag des Deutschen Bergbaumuseums (ISBN 3-921533-90-2), Bochum 2003

Kupfer

- Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der BGR, Rohstofflisten 2014, Rohstoffinformationen 24., 2014
- U.S. Geological Survey (USGS) 2015, Copper, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>, 11.11.2015
- Wood Mackenzie, Aurubis Login. Daten März 2015,
- Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der BGR, Rohstoffinformationen 16, Kupfer, 2013.
- M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, W. G. Davenport, Extractive Metallurgy of Copper, 5th ed., 2011.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2015, http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Biomining/biomining_node.html, 11.11.2015
- International Copper Study Group (ICGS) 2015, World refined copper production and usage trends 2009-2015, <http://www.icsg.org/index.php/statistics/selected-data>, 11.11.2015.
- Deutsches Kupferinstitut, <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/system/recycling-kupfer.html>, 17.06.2015

Lithium

- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Seite 94-95, January 2015

Magnesit

- Weiß V., Die Aufbereitung von Magnesit, Handbuch der Keramik, Verlag Schmid, Freiburg, 1968
- Magnesium Characteristics and Advantages, Bull. No. 141-310, The Dow chemical Company, Midland, Mich., 1965

Magnesium

- U. S. Geological Survey; Mineral Commodity Summaries: Magnesium: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/2015>
- N. Neelameggham, B. Brown: Magnesium, in: Critical Metals Handbook, Gunn, G. (Ed.), 2014, John Wiley & Sons, Ltd., S. 261-281, 2014
- P. Zippel, S. Siefen, M. Höck: Analyse und Prognose des Magnesiummarktes, in: Metall, 67. Jg., Vol. 5, S. 208-2013, 2013
- Umweltbundesamt: Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zement-, Kalk- und Magnesiumoxidindustrie, Dessau, S. 331-380, 2010
- L. M Pidgeon, W. Alexander: Thermal production of magnesium – pilot plant studied on the retort ferrosilicon process, in: transactions American Institute of Mining and Materials Engineers, Vol. 159, S. 315-352, 1944
- S. Ramakrishnan, P. Koltun: Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process – Resources, in: Conservation and Recycling, Vol. 42, S. 4964, 2004
- O. Wallevik et al.: Magnesium Electrolysis, in: International Magnesium Association (Ed.): Magnesium Technology 2000 – TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), S. 13-16, 2000
- L. H. Prentice, N. Haque: Magsonic™ carbothermal technology compared with the electrolytic and Pidgeon processes – In: Mathaudhu, S. N. et al. (Ed.): Magnesium Technology 2012 – TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), S. 3741, 2012
- D. J. Zuliani, D. Reeson: Developments in the Zuliani Process for Gossan Resources` Magnesium Project, in: International Magnesium Association (Ed.): Proceedings of the 69th Annual World Magnesium Conference May 2022, 2012, San Francisco, California, S. 113123, 2012
- S. Pati, et al.: Scalingup solid oxide membrane electrolysis technology for magnesium production, in: International Magnesium Association (Ed.): Magnesium Technology 2012 – TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), S. 4348, 2012
- A. Dietze, C. Scharf: Recycling of Magnesium, Papierflieger Verlag, Clausthal-Zellerfeld
- T. Hossieni, C. Selomulya and L. Zhang: “Comparison of Magnesium Oxide Extraction from Victorian Brown Coal Fly Ash and Steel Making Slag Using Regenerative Ammonium Chloride”, Dep. Of Chem. Eng., Monash University, Victoria 3800, Australia, Chemeca Conference 2013; <http://arrow.monash.edu.au/hdl/1959.1/960108>, 2008
- D. Paterson: “LMG Signs Ash Supply Term Sheet with Hazelwood Power”, Latrobe Investor information 03/08/2015, <http://www.latrobemagnesium.com/DOCS/Announcements%202015/Ash%20Supply%20Term%20Sheet%2003-Aug-15.pdf>

Niob

- British Geol. Survey: Commodity Profile “Niobium-Tantalum”, 2011
- Firmeninformation CBMM, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineracao: Mine and Operations, www.cbmm.com.br
- DNPM Departamento Nacional de Producao Mineral, Brasilien: “Sumario Mineral Brasileiro 2009”

Phosphate/ Phosphatgestein

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR, Phosphat – Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit, 2013.
- Bundesregierung, Information aus der Presse, 2013
- M. Bertau, A. Müller. P. Fröhlich, M. Katzberg, Industrielle Anorganische Chemie, 4. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, S. 50-70 u. 171-178, 2013
- IFA – International Fertilizer Institute (2012): IFADATA; Paris. <http://www.fertilizer.org/ifa/ifadata/search>, Stand 18.08.2013
- D. Cordell, J.-O. Drangert, S. White, Global Env. Change 19, 292-305, 2009

4. LITERATURVERZEICHNIS

- J. Elser, S. White, Peak Phosphorus, Foreign Policy, (online verfügbar: http://www.foreignpolicy.com/articles/2010/04/20/peak_phosphorus?page=0,0), Ausgabe vom 20. April 2010

Seltenerdmetalle

- Europäische Kommission: The European Critical Raw Materials review. Brüssel. URL: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-14-377_en.htm [Stand 2015-04-07], 2014
- Ch. Hagelüken: Recycling of (critical) metals, in Gunn, Gus (Hg.): Critical Metals Handbook. Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK: John Wiley & Sons, 41–46, 2014
- Molycorp Inc.. Separating rare earths at Mountain Pass. URL: <http://www.molycorp.com/resources/%20science-center> [Stand 2015-04-10], 2013
- S. R. Taylor & S. M. McLennan: The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Geol. Mag. 122(06), 673, 1985
- F. Wall: Rare earth elements, in Gunn, Gus (Hg.): Critical Metals Handbook. Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK: John Wiley & Sons, 312–339, 2014
- M. Humphries: Rare Earth Elements: The Global Supply chain. Congressional Research Service, 7-57000, R41347. Washington D.C., Dec. 16, 2013
- J. G. Tiess, A. Tukker, and A. Walton (eds.): ERECON Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options. Kooroshy, URL: http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon/index_en.htm am 09.07.2015
- R Gauß, O. Diehl, E. Brouwer, K. Güth, O. Gutfleisch: Verfahren zum Recycling von seltenerdhaltigen Permanentmagneten, Chemie Ingenieur Technik, 2015

Silicium

- Kalweit et al.: Handbuch für Technisches Produktdesign. Material und Fertigung. Entscheidungsgrundlage für Designer und Ingenieure, 2. überarbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- Bertau et al.: Industrielle Anorganische Chemie – 4. Vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2013
- W. Zulehner, B. Neuer, G. Rau: Silicon in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, doi:10.1002/14356007.a23_721, 2005
- Hilleringmann: Silizium-Halbleitertechnologie. Grundlagen mikroelektronischer Integrationstechnik. 6. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- Laure et al.: Hochleistungsplasmaverfahren für die wirtschaftliche Produktion von Solargrade Silizium. Abschlussbericht. Online: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-23845.pdf>, 2011
- European Commission: Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014
- ISWA Photovoltaikmodule – Umweltfreundlichkeit und Recyclingmöglichkeiten. Abschlussbericht, 2012
- <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Verfahrenstechnik/Recycling-Silizium-Herstellungskosten-fuer-Solarzellen-senken>
- Roeser: Werkstoffliche Recyclingraten bei verschiedenen Mineralen und Metallen, 2010
- Friedrich: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Vieweg. Wiesbaden, 2013
- RECOM. Edelmetallrecycling: Siliziumrückgewinnung. Wertschöpfung garantiert.
- Kernbaum, Hübner: Recycling von Photovoltaikmodulen, 2013
- <http://de.solarcontact.com/blog/2013/05/solarmodule-funktioniert-das-recycling/>

Wolfram

- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Tungsten, Tungsten Alloys, and Tungsten Compounds, Wiley-VCH, Weinheim, 2014
- EU Critical Raw Materials Profiles: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-critical-material-profiles_en.pdf, Zugriff Juni 2015:
- Ormonde Mining PLC.: http://ormondemining.com/en/investors/about_tungsten/tungsten_metal_uses, Zugriff Juni 2015
- P.K. Katiyar, N.S. Randhawa, J. Hait, R.K. Jana, K.K. Singh, T.R. Mankhand: ICNFM, Nagpur, 2014
- L. Luo, T. Miyazaki, A. Shibayama, W. Yen, T. Fujita: Min. Eng. 16, 665-670, 2003
- J.F. Paulino, J.C. Afonso, J.L. Mantovano, C.A. Vianna, J.W. Silva Dias da Cunha: Hydrometallurgy 127-128, 121-124, 2012
- K. Srinivas, T. Sreenivas, R. Natarajan, N.P.H Padmanabhan, Hydrometallurgy 58, 43-50, 2000
- J. Zeng, X. Sun, L. Zheng, Q. He, S. Li, Chin. J. Chem. Eng. 20(5), 831-836, 2012
- D. Huy et al., Deutschland – Rohstoffsituation 2013, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Zugriff Juni 2015: <http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/>, 2014

Zink

- U. Dorner: Rohstoffrisikobewertung - Zink. DERA Rohstoffinformationen. Berlin, 2014
- S. Grund: Die Bedeutung von Recycling für die Verfügbarkeit von Zink. DERA Industrieworkshop „Zink“, 28.01.2015, Hannover, 2015
- Initiative Zink: Zinkrecycling. Unternehmenshomepage, 2015
- Lenntech BV: Zink (Zn). Unternehmenshomepage. Delft, 2015
- M. L. Piret: EAF Dust Processing: Rotary Hearth a Potential Substitute for the Waelz Kiln? In: World of Metallurgy - ERZMETALL (65), S. 306–316, 2012
- USGS: Zinc, 2015
- WVM: Die NE-Metalle, 2015

Zinn

- Makrocheck (Hg.): Zinn schreit nach höheren Preisen. Zürich, Schweiz, 2013
- Wittmer, Erren, Lauwigi, Ritthoff & Dressler: Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) Teil:2. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Wuppertal, 2011
- ITRI: Historical trends in tin usage. ITRI Briefing, 2011
- Graf: Tin, Tin Alloys, and Tin Compounds. In: Ullmans Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley VCH-Verlag, Weinheim, 2012
- ITRI: Tin mining and processing methods. ITRI Briefing, 2012
- USGS: Metal Prices in the United States Through 2010. Unter Mitarbeit von Carlin. Virginia, 2013
- BGR: DERA Rohstoffinformation Nr. 20: Zinn - Angebot und Nachfrage bis 2020. Unter Mitarbeit von Elsner, Schmidt (Risikobewertung) & Schütte (Ruanda). BGR, B1.1 (DERA) / B1.2. Berlin, 2014
- Mertens: Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis: Spektrum, Akad. Verl., 2011
- Jianzhi, Shrivastava, Zong & Hong-Chao: Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey. In: IEEE Trans. Electron. Packag. Manufact. 27 (1), S. 33–42, 2004
- Aurubis: Recyclingtechnologie, 2012
- ITRI: Tin for Tomorrow. Contributing to Global Sustainable Development, 2012

5. Autorenverzeichnis

Dipl.-Ing. Tim Aubel, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft, Freiberg
Dr. Rainer Aul, Rockwood Lithium GmbH, Frankfurt am Main
Prof. DI Dr. techn. Hans-Jörg Bart, TU Kaiserslautern
Prof. Dr. Martin Bertau, TU Bergakademie Freiberg
Dr. Katrin Bokelmann, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
M. Sc. Florian Binz, Institut für metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen
Dipl.-Ing. Christian Cymorek, H.C. Starck GmbH, Goslar
Dipl.-Wi.-Ing. Franz Fehse, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr. Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich, Institut für metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen
M.Sc. Karina Fries, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dr. Peter Fröhlich, TU Bergakademie Freiberg
Dr. Roland Gauß, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dr. Carsten Gellermann, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
M.Sc. Nora Groth, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dr. Christian Hagelüken, Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang
Dr. Roland Haseneder, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr. Thomas Hirth, Fraunhofer IGB, Stuttgart
Prof. Dr. Michael Höck, TU Bergakademie Freiberg
Dr. Gert Homm, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dr. Eberhard Janneck, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft, Freiberg
M. Sc. Alexander Karos, Fraunhofer IGB, Stuttgart
Dipl.-Ing. Frank Kaußen, Institut für metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen
Wolfgang Kummer, MoReW refractory metals consulting, Goslar
Dipl.-Chem. Mirko Martin, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft, Freiberg
Dr. Alexander Maurer, ICL Performance Products, Ludwigshafen
Maximilian Melzer, Graphit Kropfmühl GmbH, Hauzenberg
Nikolaus Nagel, Materion Brush GmbH, Stuttgart
Dr. Jörg Nispel, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dr. Carsten Pätzold, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr. Urs Peuker, TU Bergakademie Freiberg
Dipl.-Chem. Marcel Picard, Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang
Sophie Quecke, BeST – Beryllium Science & Technology Association, Brüssel/ Belgien
Prof. Dr.-Ing. Jens-Uwe Repke, TU Bergakademie Freiberg
Dr.-Ing. Elinor Rombach, Institut für metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen
M.Sc. Adriana Sanz Mirabal, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dr. Karl-Josef Sassen, DK Recycling und Roheisen GmbH, Duisburg
Dipl.-Chem. Norbert Schreiter, TU Bergakademie Freiberg
Dr.-Ing. Hans -Werner Schröder, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr. Gerhard Sextl, Fraunhofer ISC, Würzburg
Prof. DI Dr. Matthäus Siebenhofer, TU Graz/Österreich
Prof. Dr. Rudolf Stauber, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
M.Sc. Philipp Steverding, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel, Mechanische Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg
Dipl.-Ing. Frank Treffer, Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang
M.Sc. Frances Vaak, Fraunhofer ISC – Projektgruppe IWKS, Alzenau und Hanau
Dipl.-Ing. Andreas Villak, SolarWorld Industries Sachsen GmbH, Freiberg
Martin Walter, CRONIMET Mining AG, Karlsruhe
Dr. Katja Weichert, Aurubis AG, Hamburg
Dr. Claudia Weidlich, DECHEMA-Forschungsinstitut, Frankfurt am Main
Prof. Dr. Harald Weigand, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen
Dipl.-Ing. Katja Wendler, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
Dipl.-Ing. Arite Werner, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky, Fraunhofer IGB, Stuttgart

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