

SITZUNGSBERICHTE

LEIBNIZ-SOZietät DER WISSENSCHAFTEN

**Das neue europäische Gesetz zu
kritischen Rohstoffen
The Critical Raw Materials Act:
Herausforderungen und Maßnahmen**

Kolloquium der Leibniz-Sozietät der
Wissenschaften am 20. März 2025

Herausgegeben von
Gerhard Pfaff, Reinhard O. Greiling,
Christoph Hilgers & Axel Müller

Mit Beiträgen von Olaf Alisch, Andreas Börner,
Reinhard O. Greiling, Gerda Haßler, Rainer Herd,
Christoph Hilgers, Jochen Kolb, Uwe Lehmann,
Mirko Martin, Axel Müller, Jasemin Ölmez,
Gerhard Pfaff, Norbert Rethmann, Henrik Rother,
Axel Schippers, Karsten Schütze, Melike Yildirim



BAND 166

JAHRGANG 2025

LEIBNIZ-SOZietÄT: SITZUNGSBERICHTE

SITZUNGSBERICHTE
BAND 166 JAHRGANG 2025



LEIBNIZ-SOZIETÄT DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN

Impressum

Herausgeberin: Gerda Haßler, Präsidentin der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

Briefanschrift: Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

Langenbeck-Virchow-Haus, Luisenstr. 58/59, 10117 Berlin

Homepage <http://www.leibnizsozietat.de>

Briefanschrift der Redaktion:

Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V., Redaktionskollegium,

Langenbeck-Virchow-Haus, Luisenstr. 58/59, 10117 Berlin

Im Auftrag der Leibniz-Sozietät e.V. erschienen im trafo Wissenschaftsverlag

Dr. Wolfgang Weist, Finkenstr. 8, 12621 Berlin

Telefon: 030/ 612 99 418

e-mail: info@trafoberlin.de

Die Reihe „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ erscheint in

unregelmäßigen Abständen online unter

<https://leibnizsozietat.de/publikationen/sitzungsberichte/>.

Redaktionelle Durchsicht dieses Bandes: Redaktionskollegium der Leibniz-Sozietät
Redaktionsschluss: 10.11.2025

DOI: 10.53201/SITZUNGSBERICHTE166

ISSN 0947-5850

ISBN 978-3-86464-272-2

Inhalt

Gerhard Pfaff, Reinhard O. Greiling, Christoph Hilgers, Axel Müller Vorwort	7
Gerda Haßler Grußwort	17
Christoph Hilgers, Melike Yildirim, Jasemin Ölmez Verordnung über kritische Rohstoffe der EU (CRMA) – Chancen und Herausforderungen	21
Olaf Alisch Critical Raw Materials Act – Chancen, Umsetzung und Hemmnisse für Deutschland aus Sicht des Verbandes Bergbau, Geologie und Umwelt e.V.	35
Uwe Lehmann Ausgewählte rohstoffgeologische Aspekte der Umsetzung des Critical Raw Materials Act in Sachsen	53
Andreas Börner, Karsten Schütze, Henrik Rother, Axel Schippers, Mirko Martin Rohstoffgeologische Erfassung des Schwermineralpotenzials in Ostseesanden in Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen des Projektes SEEsand	75
Jochen Kolb Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern in Süddeutschland – ein Beitrag zum Critical Raw Materials Act	103

Rainer Herd	129
D-MTUC das airborne Rohstofferkundungssystem der BTU	
Norbert Rethmann	141
Recycling kritischer Rohstoffe in Deutschland	
Axel Müller	173
Diversifikation der Rohstoffimporte Deutschlands am Beispiel Skandinaviens	
Verzeichnis der Autorinnen und Autoren	201

Vorwort

Gerhard Pfaff (Berlin, MLS), **Reinhard O. Greiling** (Karlsruhe, MLS), **Christoph Hilgers** (Karlsruhe, MLS), **Axel Müller** (Oslo, MLS)

Am 20. März 2025 veranstaltete die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin das Kolloquium „*Das neue europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen – The Critical Raw Materials Act: Herausforderungen und Maßnahmen*“. Das Kolloquium stellte die Fortsetzung der in den Jahren 2022, 2023 und 2024 durchgeführten Veranstaltungen zum Thema „Kritische Rohstoffe“ dar. Die Ergebnisse dieser Kolloquien sind in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät in den Bänden 154/2022, 159/2023 und 163/2024 publiziert worden. Der vorliegende Band 166 der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin vereint die Beiträge dieses Kolloquiums in schriftlicher Form und stellt diese damit interessierten Leserinnen und Lesern zur Verfügung.

Am 23. Mai 2024 ist das europäische Gesetz zur Sicherung der Versorgung der EU-Länder mit kritischen Rohstoffen für die Erreichung der Klimaziele und nachhaltiger Entwicklung – *The Critical Raw Materials Act* (CRMA) – in Kraft getreten. Das Gesetz hat die Zielstellung bis 2030 den strategischen Rohstoffbedarf zu mindestens zehn Prozent in der Europäischen Union abzubauen, zu mindestens 40 Prozent in der EU zu verarbeiten und zu mindestens 15 Prozent aus der europäischen Kreislaufwirtschaft zu gewinnen. Damit soll die Abhängigkeit von externen Lieferanten für kritische Rohstoffe verringert werden, um die strategische Autonomie der EU zu stärken. Das Kolloquium hatte sich das Ziel gesetzt, eine erste Analyse vorzunehmen, inwieweit die Ziele ein Jahr nach Inkrafttreten des Gesetzes verfolgt werden und realistischer Weise

erreichbar sind. Eingeladen waren Rohstoffwissenschaftler und Vertreter der geologischen Dienste und Landesämter sowie der Industrie.

In einem Vortragsraum der Technischen Universität Berlin am Ernst-Reuter-Platz 1 begrüßte die Präsidentin der Leibniz-Sozietät *Gerda Haßler* die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Kolloquiums. Diese nahmen sowohl in Präsenz als auch per Zoom am Kolloquium teil.

In ihrer Eröffnung verwies *Gerda Haßler* auf die drei vorangegangenen Veranstaltungen zu kritischen Rohstoffen. Die Präsidentin bedankte sich am Ende ihrer Ausführungen bei allen Referenten sowie bei den Organisatoren der Veranstaltung Gerhard Pfaff, Reinhard O. Greiling, Christoph Hilgers und Axel Müller (alle MLS) und wünschte dem Kolloquium einen erfolgreichen Verlauf.

Den ersten Fachvortrag des Kolloquiums mit dem Titel „*Inhalt des Critical Raw Materials Acts (CRMA)*“ hielt *Christoph Hilgers* (Koautoren *Melike Yildirim*, *Jasemin A. Ölmez*). Der Vortragende ging in seinen Ausführungen auf einige Aspekte der am 23.5.2025 in Kraft getretenen Verordnung 2024/1252 der EU27 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit Rohstoffen“ (Critical Raw Materials Act CRMA) ein. Der CRMA beinhaltet die fristgemäße Umsetzung der Inhalte in nationales Recht, insbesondere die Erhöhung der Versorgungssicherheit mit strategischen Rohstoffen. Er gibt vor, bis 2030 einen Anteil von 10% des EU-Verbrauchs an strategischen Rohstoffen durch Bergbau innerhalb der EU zu gewinnen, 40% sollen in der EU prozessiert und 15% durch Recycling sichergestellt werden. Der Rohstoffimport von Drittländern ist zudem zu diversifizieren, wenn mehr als 65% des EU-Verbrauchs aus einem einzigen Land geliefert werden. Dazu sollen Verfahren vereinfacht und Prozesse beschleunigt werden. Ebenso gibt der CRMA auch produktspezifische Kennzeichnungs- und Informationspflichten des produzierenden Gewerbes vor, um strategische Rohstoffe in Produkten nachverfolgen zu können. Der CRMA soll demzufolge zu Maßnahmen führen, die in absehbarer Zeit die sichere Verfügbarkeit von tatsächlich vorhandenen Rohstoffen mit resilienten Lieferketten gewährleisten. Ob der zusätzliche bürokratische Aufwand für das produzierende Gewerbe dazu beiträgt, Rohstoffe für die EU zu sichern, bleibt abzuwarten.

Der Vortrag von *Jan Klasen* zum Thema „*Die Förderung kritischer Rohstoffprojekte durch den deutschen Rohstofffond*“ stellte die Sicherstellung

einer nachhaltigen Rohstoffversorgung als eine der zentralen Grundlagen für die deutsche Wirtschaft, die digitale Transformation und die Erreichung der Klimaziele in den Mittelpunkt. Die Bundesregierung hat sich von diesen Punkten ausgehend entschlossen, einen Rohstofffonds aufzusetzen, mit dem die Rohstoffversorgung deutscher Unternehmen und die Resilienz der Lieferketten und der Volkswirtschaft insgesamt gestärkt werden soll. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) dient als zentraler Ansprechpartner für den Rohstofffonds. Grundsätzlich zielt der Rohstofffonds darauf ab, Projekte im In- und Ausland zu fördern, die einen Beitrag zur Rohstoffversorgungssicherheit leisten und der Gewinnung, Verarbeitung und dem Recycling von kritischen Rohstoffen dienen. Gleichzeitig soll der Rohstofffonds Abhängigkeiten Deutschlands von anderen Staaten verringern. Maßgabe hierbei soll sein, dass durch Projektbeteiligungen oder Vereinbarungen mit Projektgesellschaften ein Beitrag zur Stärkung der Binnenwirtschaft durch den langfristigen Bezug kritischer Rohstoffe, auch in weiterverarbeiteter Form, für Produktionsstandorte in Deutschland oder der EU geleistet wird. Anspruch auf Förderung haben Projekte im Bereich Bergbau, Weiterverarbeitung und/oder Recycling kritischer Rohstoffe. Die Exploration ist nicht Gegenstand der Förderung. Genutzt werden diversifizierte Finanzierungen, insbesondere Eigenkapitalinstrumente. Das Finanzierungsbudget wird in der Regel zwischen EUR 50 Mio. und EUR 150 Mio. liegen. Ein Rechtsanspruch auf Förderung besteht nicht. Der Vortragende wies am Ende seines Vortrags darauf hin, dass die Förderung unter dem Vorbehalt der Verfügbarkeit von Haushaltsmitteln steht.

Olaf Alisch stellte in seinem Vortrag „*Critical Raw Materials Act – Chancen, Umsetzung und Hemmnisse für Deutschland aus Sicht des Verbandes Bergbau, Geologie und Umwelt e.V.*“ die im Verband Bergbau Geologie und Umwelt e.V. existierenden Bergbauprojekte von Mitgliedsunternehmen vor, insbesondere diejenigen mit Bezug auf kritische und strategische Rohstoffe nach EU-Kriterien. Strategische Projekte für Rohstoffe leisten im Sinne des CRMA einen bedeutenden Beitrag zur Sicherung der EU mit strategischen Rohstoffen. Diese sind in den Mitgliedsstaaten der EU mit einer höchstmöglichen nationalen Bedeutung einzuordnen. Genehmigungsverfahren und die Dauer dieser Verfahren haben dabei eine hohe Bedeutung. Bei strategischen Projekten darf das Genehmi-

gungsverfahren maximal 27 Monate (ausgenommen die Umweltverträglichkeitsprüfung) dauern. Die Anerkennung für strategische Projekte erfolgte gemäß der zuständigen EU-Kommission bis zum 15. März 2025. Der Referent ging weiterhin darauf ein, welche Chancen sich durch den CRMA für Deutschland in Bezug auf die Gewinnung heimischer Rohstoffe ergeben und welche Erfahrungen es bei der Beantragung von Rohstoffprojekten im Verband Bergbau, Geologie und Umwelt e.V. inzwischen gibt.

Uwe Lehmann ging in seinem Vortrag *„Ausgewählte rohstoffgeologische Aspekte der Umsetzung des Critical Raw Materials Act in Sachsen“* zunächst auf den weltweiten Rohstoffbedarf ein, der besonders in den vergangenen beiden Dekaden stark angestiegen ist und der bei zahlreichen Rohstoffen zu zeitweisen Engpässen geführt hat. Um diesem auch in Europa spürbaren Mangel zu begegnen, hat die EU 2011 begonnen, kritische und zuletzt auch strategische Rohstoffe zu definieren und mittels des 2024 verabschiedeten CRMA eine gesicherte Rohstoffversorgung insbesondere mit diesen ausgewählten Rohstoffen (wieder) herzustellen. Sowohl die Auswahl und Benennung der als vorrangig eingestuften Rohstoffe, als auch die Herangehensweise an die Umsetzung des CRMA werfen aus rohstoffgeologischer Sicht einige Fragen auf, die am Beispiel Sachsens näher dargestellt wurden. Der Vortrag arbeitete heraus, dass zur konsequenten Bewältigung der sich ergebenden zahlreichen Herausforderungen und letztlich zur bergbaulichen Gewinnung heimischer Rohstoffe sowie zur Überwindung von Mangelsituationen eine Bereitstellung der dazu erforderlichen Ressourcen (finanziell und personell) unabdingbar ist.

Der Vortrag von Blas Urioste *„Das strategisches Rohstoffprojekt Kupferlagerstätte Spremberg-Graustein-Schleife“* legte den Fokus auf ein Projekt zur Erschließung der Kupferlagerstätte Spremberg-Graustein. Dieses geht auf eine lange zurückliegende Zeit zurück, war viele Jahre durch politische Entscheidungen unterbrochen und wurde erst in jüngerer Zeit von der KSL Kupferschiefer Lausitz wieder aufgenommen. Als KSL verlautbarte, ein Bergwerk in Deutschland voranzubringen, reagierte die internationale Bergbaugemeinschaft mit Skepsis. Deutschland sei ein Land, in dem man Maschinen kaufte oder Ingenieure einstellte, aber kein Land, in dem man noch nach Bodenschätzen suche. In Deutschland selbst machten Skepsis und Desinteresse die Sache nicht einfacher. Dennoch investierte KSL weiter und hielt an dem Projekt fest, so dass

der Spremberger Grauschiefer heute einen wichtigen Beitrag zur aktuellen Rohstoffstrategie Deutschlands leisten kann. Die KSL wurde mit der Vision gegründet, dass Kupfer ein strategisches Metall ist und dass Investitionen in den Bergbau am besten in rechtsstaatlich gefestigten Staaten getätigt werden. Heute gibt es mit dem CRMA eine Bestätigung dieser Vision. Die KSL ist nun dabei, den CRMA zur Wiederbelebung des europäischen Bergbaus in konkrete Maßnahmen und Projekte umzusetzen. Mit einem Vorkommen von 90 Mio. Tonnen Kupfererz könnte man maßgeblich (bis zu 50%) zur Erreichung der deutschen nationalen Produktionsziele beitragen. Geothermie, ein schonender Umgang mit den Ressourcen Wasser und Fläche, eine starke Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks bei Bau und Produktion sowie innovative Abbau- und Aufbereitungsmethoden prägen das nachhaltige Konzept. KSL versteht sich als Brückenbauer zwischen Behörden, Politik und Gesellschaft, um gemeinsam Lösungen für die Herausforderungen der modernen Rohstoffgewinnung zu entwickeln. Das Ziel lautet: Kupfer für Deutschlands industrielle Zukunft – gefördert in Deutschland, gestaltet mit Europa.

Andreas Börner (Koautoren *Karsten Schütze, Henrik Rother, Axel Schippers, Mirko Martin*) stellte in seinem Vortrag „*Erfassung und Extraktion von Seltenen Erdelementen (SEE) aus Schwermineralen mariner Ostseesande. Das Projekt SEEsand – ein regionaler Beitrag zum EU-Critical Raw Materials Act in Mecklenburg-Vorpommern*“ dar, dass in Mecklenburg-Vorpommern jährlich ca. 500.000 Tonnen Ostseesande gewonnen und zu Baustoffen verarbeitet bzw. für Küstenschutzmaßnahmen eingesetzt werden. Diese Massenförderung kann durch Aufbereitung eine Möglichkeit bieten, die vorhandenen Schwerminerale abzutrennen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts SEEsand bearbeitete der Geologische Dienst Mecklenburg-Vorpommern die archivierten analogen Erkundungsdaten (1960-1990) zu marinen Sandvorkommen der Ostsee sowie deren Schwermineralanteile und bewertete das Rohstoffpotenzial neu. Unter Hinzuziehung neuer Erkundungsdaten (1992-2017) wurden 15 Erkundungsfelder auf 5.057 km² im Ostseebereich Mecklenburg-Vorpommerns ausgewiesen, in welchen Informationen aus 7.164 Erkundungsbohrungen und im Labor ermittelten Schwermineralgehalten aus 21.526 Schichten vorliegen. Insgesamt wurde im Projekt SEEsand über statistische Schätzungen ein Schwermineralpotenzial von 419.137 Tonnen inklusive 27.408 Tonnen Zirkon berechnet. Im Projekt

wurden Ostseesande aufbereitet, um die Schwerminerale zu extrahieren. Das untersuchte Schwermineral Zirkon enthält u.a. auch Anteile an Seltenen Erden. Die Schwermineralfraktionen wurden durch Dichtentrennung in Kombination mit Magnetscheidung abgetrennt. Dabei fallen Titanminerale, Granat und Quarzsand als Nebenkomponten an. Es wurde neben selektiver chemischer Laugung eine Aufbereitung über biohydrometallurgische Verfahren und eine Abtrennung der schweren Seltenen Erden durch fraktionierte Fällungsverfahren und Biosorptionsprozesse im Labor geprüft. Die Durchschnittsgehalte von Schwermineralen in Ostseesanden variieren zwischen 0,5 und 0,9%. Die Gehalte der Zielrohstoffe in den untersuchten marinen Sanden betragen ca. 0,0025% Seltenerdkonzentrat in den Zirkonen (davon ~90% HREE/~5% Dy), 0,025% Zirkoniumoxid, 0,1% Titan (bzw. 0,5% Titankonzentrat) und 1% Granat. Die bilanzierten Schwermineralpotenziale inklusive Zirkon werden als geschätzte Potenziale bzw. nach der United Nations Framework Classification (UNFC) als „indicated resources“ bewertet. Eine Bewertung der Abbauwürdigkeit von Schwermineralen aus Ostseesanden könnte sich ändern, wenn der europäische Bedarf nicht mehr über Weltmarktimporte ausreichend gedeckt werden kann.

Die Ausführungen von *Jochen Kolb* hatten das Thema „*Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern in Süddeutschland – ein Beitrag zum CRMA*“ zum Inhalt. Der Vortrag zeigte auf, dass die Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern in Süddeutschland eine vielversprechende Möglichkeit, den steigenden Bedarf an Lithium für Batterien in der Elektromobilität zu decken, darstellt. Geothermie-Anlagen in der Region, insbesondere im Oberrheingraben, könnten in Zukunft nicht nur Energie liefern, sondern auch Lithium extrahieren. Im Rahmen des CRMA wird die strategische Bedeutung von Lithium hervorgehoben, da es als kritischer Rohstoff für die Energiewende gilt. Die Nutzung von Geothermalwässern zur Lithiumproduktion könnte somit nicht nur die Versorgungssicherheit in Europa erhöhen, sondern auch die Abhängigkeit vom Import aus anderen Ländern reduzieren. Unerlässlich ist jedoch der gleichzeitige Aufbau der heimischen Batterieproduktion. Das Geothermalwasser enthält in einigen Regionen hohe Konzentrationen an Lithium (150-200 mg/l), das durch verschiedene Verfahren gewonnen werden kann. Als vielversprechende Methode hat sich die Sorption bzw. der Ionenaustausch herausgestellt. Im Labor- und Pilotmaßstab können so >90% des Lithiums gewonnen werden. Dieses Zwischenprodukt

muss dann zu batteriefähigem Material weiterverarbeitet werden. Schon die bekannten Vorkommen im Oberrheingraben könnten knapp 1% der globalen Nachfrage (2023) decken. Das Potenzial, auch in Norddeutschland, ist wesentlich größer. Die Gewinnung von Lithium aus Geothermalwässern hat mehrere Vorteile: Sie ist umweltfreundlicher im Vergleich zu traditionellen Bergbaumethoden, da sie keine großen Flächen beansprucht und keine giftigen Chemikalien verwendet. Zudem wird die Lithiumproduktion direkt mit der Gewinnung von erneuerbarer Energie kombiniert, was die ökologische wie ökonomische Nachhaltigkeit des gesamten Prozesses stärkt. Fazit des Vortrags: In Süddeutschland, einer Region mit zahlreichen Geothermieprojekten, und auch in Norddeutschland könnte die Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern eine effiziente Methode darstellen, die Rohstoffversorgung für die Batterietechnologie zu diversifizieren.

Rainer Herd stellte in seinem Vortrag *D-MTUC – das airborne Rohstofferkundungssystem der BTU*“ neueste Ergebnisse seiner Forschungsarbeiten mit dem Forschungsflugzeug der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus-Senftenberg vor. Das Flugzeug wurde 2012/2013 mit internationalen Partnern am Lehrstuhl für Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft als Rohstofferkundungssystem entwickelt. Das Messsystem D-MTUC basiert auf einem stark modifizierten Ultraleicht-Flugzeug des Typs „VIRUS SW 100“ des slowenischen Herstellers Pipistrel. Es wurde als rauscharmes (low magnetic noise) Multi-Sensor-System konzipiert. Je nach Fragestellung können verschiedene Sensoren unter den Tragflächen, an den Flächenenden (wing-tips), im Rumpf oder unter dem Rumpf installiert werden. Die Basisausrüstung besteht aus zwei Kalium-Magnetometern, einem 4L-Cäsiumjodid-Gammaspektrometer, einem VLF-EM-System, einem Datenakquisitions- und Kontrollsystem sowie einem Radar- und Laserhöhenmesser. Das Flugzeug weist eine Reihe von Besonderheiten auf, die es von anderen Systemen merklich unterscheidet (Faserverbund-Bauweise, Zerlegbarkeit, Robustheit, geringe Start- und Landestrecke, große Reichweite, sehr gute Ruderabstimmung, geringer Treibstoffverbrauch). Eine konstruktive Besonderheit ist die Ausrüstung des Flugzeugs mit Störklappen. Diese erlauben die Durchführung von Konturflügen, die der Topographie folgen – ein bedeutender Vorteil gegenüber anderen fixed-wing Messplattformen. Im Rahmen von diversen Projekten im In- und Ausland unter den verschiedensten Bedingungen konnte das Gesamtsystem seine Leistungsfähigkeit und

Zuverlässigkeit unter Beweis stellen. Die Ausführungen endeten mit dem Ausblick, dass das Messsystem nach einem 5-jährigen Einsatz in der Mongolei nun wieder für einen Einsatz in Deutschland und Europa zur Verfügung steht.

Der Vortrag von *Norbert Rethmann* zum Thema „*Recycling kritischer Rohstoffe in Deutschland*“ zeigte auf, wie stark Deutschland als Industrienation auf eine sichere, dauerhafte und kostengünstige Rohstoffversorgung angewiesen ist. Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und Wohlstand Deutschlands hängen von der Verfügbarkeit von Rohstoffen ab. Viele unverzichtbare Rohstoffe sind jedoch in Deutschland und der EU kaum vorhanden. Je nach Rohstoff ist das Angebot häufig auf wenige Länder konzentriert. Die Versorgungslage ist aber nicht nur sehr fragil, sondern die natürlichen Rohstoffvorkommen der Erde sind auch begrenzt. Es ist absehbar, dass einzelne Rohstoffe, die heute noch als unverzichtbar gelten, schon in wenigen Jahrzehnten nicht mehr gefördert werden können. Durch innovatives Recycling von Rohstoffen ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für die deutsche Industrie. Wenn Rohstoffe einfach und sortenrein erfasst werden können, lassen sich enorme Potenziale für die Wiederverwendung erschließen. Und gleichzeitig zeigt sich, dass Recycling einer der wesentlichen Schlüssel zur industriellen Transformation in eine klimaneutrale Gesellschaft ist, da dadurch massive CO₂-Einträge vermieden werden. Die Unternehmensgruppe *Rethmann* gewinnt schon heute Rohstoffe in einem unglaublichen Volumen durch Recyclingprozesse zurück. Das Spektrum reicht von Papier, Plastik, Glas sowie Kompost, Gips und Phosphor bis hin zu Silber oder Gold. Im Lippewerk, dem größten Standort der Gruppe in Lünen, verlassen rund 70% des Inputs das Werk wieder als Produkt oder Rohstoff. Quasi als Nebeneffekt spart das Lippewerk durch Recycling und energetische Verwertung jährlich 488.000 Tonnen CO₂ ein. Bei verschiedenen Fraktionen sind die Recyclingprozesse heutzutage gut organisiert – waren Elektrogeräte früher ein Fall für die Deponie, werden heute alle Haushaltsgeräte zu nahezu 100% stofflich recycelt. In anderen Bereichen wie zum Beispiel dem großindustriellen Recyceln von E-Autobatterien oder Solarzellen gibt es noch enorme Herausforderungen. Hochschulen, Industriepartner und Designer sind hier gefordert, neue Technologien und Verfahren zu entwickeln. Eine erfolgreiche Umsetzung der Circular Economy ist nur durch enge Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und politischen

Akteuren möglich. Innovative Recyclingstrategien, so das Fazit des Vortrags, tragen ihren Teil zu einer nachhaltigen Rohstoffversorgung in Deutschland bei und bieten ökologische Vorteile sowie wirtschaftliche Resilienz.

Im letzten Vortrag des Kolloquiums referierte *Axel Müller* zum Thema „*Diversifikation der Rohstoffimporte Deutschlands am Beispiel Skandinaviens*“. Die im CRMA festgelegten Ziele sollen maßgeblich durch die Diversifikation der Rohstoffimportländer erreicht werden. Deutschland importiert große Mengen kritischer Rohstoffe. Erze die mit mehr als 65% aus einem Land importiert werden, sind, unter anderen, Magnesium, Seltenerdmetalle und Bismut aus China, Niob-Tantal aus Thailand, Bauxit aus Guinea und Lithium aus Chile. Die Lieferketten werden oft über viele Jahre hinweg aufgebaut, jedoch mit teilweise unzureichender Diversität der Herkunftsländer. Das macht die Lieferketten anfällig für Änderungen der geopolitischen Situation. Die COVID-19-Pandemie und der russische Angriff auf die Ukraine im Jahr 2022 haben zu unerwarteten und abrupten Störungen der globalen Lieferketten geführt, von denen auch Deutschland betroffen ist. Deutschland als weltweit der drittgrößte Importeur von Nickel, bezog bis 2022 etwa 40 bis 50% des benötigten Raffinadenickels aus Russland. Da Russland ein Exportverbot für Nickel in Betracht zog, war Deutschland gezwungen, seine Nickelimporte kurzfristig umzustellen. In diesem Fall konnte Norwegen einen Großteil der deutschen Importe decken und ist seit 2023 mit einem Anteil von 29% das bedeutendste Lieferland für raffiniertes Nickel. Die skandinavischen Länder Finnland, Schweden und Norwegen sind traditionelle Bergbauländer mit einem großen Lagerstättenpotenzial, insbesondere für kritische Rohstoffe. Aufgrund der Nähe zu Deutschland und der stabilen geopolitischen Lage sind sie attraktive Rohstoffpartner. Deutschland importiert seit vielen Jahren Konzentrate bzw. Zwischenprodukte kritischer Rohstoffe aus Skandinavien. Der Vortrag stellte abschließend fest, dass angesichts der sich momentan drastisch ändernden geopolitischen Situation eine stärkere Diversifikation der Rohstoffimportländer unter verstärkter Einbeziehung Skandinaviens angestrebt werden sollte, selbst wenn keine Störungen bestehenden Lieferketten offensichtlich sind.

Zum Redaktionsschluss dieses Bandes lagen die Vorträge von *Jan Klasen* und *Blas Urioste* nicht in schriftlicher Form vor. Sie konnten demzufolge

hier nicht mit aufgenommen werden. Informationen hierzu sind über die beiden Referenten direkt zu erhalten.

Die Herausgeber des hier vorliegenden Bandes der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät zu Berlin stellen mit der Publikation der Vorträge des Kolloquiums „*Das neue europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen – The Critical Raw Materials Act: Herausforderungen und Maßnahmen*“ das von den Referenten vermittelte Wissen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung. Sie gehen davon aus, dass die Beiträge in der aktuellen Diskussion um die Verfügbarkeit und die sichere Bereitstellung von Rohstoffen wichtige Informationen liefern, die in der hier vorliegenden umfassenden Form bisher so noch nicht zugänglich sind. Gleichzeitig soll mit diesem Band gezeigt werden, inwieweit die Ziele des CRMA ein Jahr nach Inkrafttreten des Gesetzes schon länderübergreifend in der EU verfolgt werden und wie eine Erreichung der damit verbundenen Intentionen grundsätzlich möglich ist. Neben einer wünschenswerten Versorgungssicherheit mit Rohstoffen führt der CRMA zu neuen Kennzeichnungs- und Informationspflichten, die den bürokratischen Aufwand für das produzierende Gewerbe weiter erhöhen. Die Teilnahme von Rohstoffwissenschaftlern und Vertretern der geologischen Dienste und Landesämter sowie der Industrie trug wesentlich zu einem erfolgreichen und effektiven Kolloquium bei. Die hier nun vorliegenden Beiträge machen das in vollem Umfang deutlich.

Anregungen und Hinweise zu den Beiträgen dieses Bandes werden von den Herausgebern gern entgegengenommen, können aber auch direkt an die einzelnen Verfasserinnen und Verfasser gerichtet werden (E-Mail-Adressen hierzu finden sich im Verzeichnis der Autorinnen und Autoren).

Grußwort zum 4. Rohstoffkolloquium der Leibniz- Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.

Gerda Haßler
(Potsdam, MLS)

Grußwort zum 4. Rohstoffkolloquium der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.

Gerda Haßler
(Potsdam, MLS)

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen,
ich freue mich sehr, Sie heute zum Rohstoffkolloquium der Leibniz-
Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V. begrüßen zu dürfen. Es ist
bereits das vierte Mal, dass mir diese Ehre zuteilwird, und ich freue mich
sehr darüber, dass sich diese Reihe so gut etabliert hat. Nach dem Thema
des ersten Rohstoffkolloquiums „Kritische Rohstoffe, Gewinnung bis
Entsorgung: Die Geowissenschaften als Problemlöser“, des zweiten
Kolloquiums „Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer

Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas“ und des dritten Kolloquiums „Kritische Rohstoffe – große Bedeutung und geringes öffentliches Bewusstsein – was ist zu tun?“ stehen dieses Jahr die Herausforderungen und Maßnahmen im Zusammenhang mit dem neuen europäischen Gesetz zu kritischen Rohstoffen im Mittelpunkt.

Die Ergebnisse der bisherigen Kolloquien wurden in den Bänden 154, 159 und 163 der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät veröffentlicht. Mit diesen Kolloquien wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Mitglieder des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt-, Weltraum- und Astrowissenschaften unter Einbeziehung weiterer Wissenschaftler und wissenschaftlicher Institutionen gefördert.

Die Frage nach der Sicherung der Versorgung mit kritischen Rohstoffen ist eine der entscheidenden Herausforderungen unseres Jahrhunderts. Diese Rohstoffe sind essenziell für zahlreiche Industrien und für die nachhaltige Entwicklung neuer Technologien, die unsere Welt verändern und unsere Umwelt schützen können. In diesem Zusammenhang sind die Initiativen und Maßnahmen, die durch den Critical Raw Materials Act angestoßen werden, sehr zu begrüßen. Sie sind ein wichtiger Schritt, um unsere Abhängigkeit von Importen zu reduzieren und unsere industrielle Basis nachhaltig zu stärken. Die Abhängigkeit der Europäischen Union von Importen kritischer Rohstoffe führt in Verbindung mit der weltweit steigenden Nachfrage zu anfälligen Lieferketten. So stammt beispielsweise weltweit 63% des für Batterien verwendeten Kobalts aus der Republik Kongo, 97% des in der EU benötigten Magnesiums aus China und 100% der in Dauermagneten verbauten Seltenen Erden werden weltweit in China raffiniert (https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_de).

Das Gesetz zu kritischen Rohstoffen ist Teil der europäischen Strategie für eine nachhaltige und zukunftsfähige Industrie und legt einen besonderen Fokus auf den Aufbau von Resilienz und Unabhängigkeit in der Rohstoffversorgung. Es soll Europa in die Lage versetzen, auf künftige Herausforderungen in den globalen Rohstoffmärkten flexibel und auf einem soliden Fundament zu reagieren. Die Schwerpunkte des Gesetzes umfassen unter anderem die Diversifizierung der Lieferketten, die Stärkung der Rohstofferschließung innerhalb der Europäischen Union sowie die Förderung von Recycling und Effizienzsteigerungen.

Die Notwendigkeit eines solchen Gesetzes wird durch die stark wachsende Nachfrage nach kritischen Rohstoffen wie Seltene Erden, Lithium und Kobalt unterstrichen. Diese sind für den Ausbau erneuerbarer Energien und die Elektromobilität von zentraler Bedeutung. Gerade die grüne Transformation stellt hohe Anforderungen an eine nachhaltige Versorgung und einen verantwortungsvollen Umgang mit diesen Ressourcen.

Dieses neue Gesetz stellt uns jedoch auch vor erhebliche Herausforderungen. Die Festlegung von Prioritäten für die Versorgungssicherheit, die Intensivierung von Forschungsaktivitäten und die Entwicklung nachhaltigerer Alternativen sind nur einige der komplexen Aufgaben, die wir gemeinsam bewältigen müssen. Die Leibniz-Sozietät fühlt sich verpflichtet, durch ihre Expertise und ihre interdisziplinäre Forschung einen Beitrag zu diesen Bemühungen zu leisten. Wir stehen heute an einem Punkt, an dem Wissenschaft, Industrie und Politik ihre Kräfte bündeln müssen, um eine widerstandsfähige und nachhaltige Rohstoffversorgung sicherzustellen. Der Austausch von Ideen und die Kooperationen, die während dieses Kolloquiums entstehen, sind von großer Bedeutung, um innovative Lösungen zu finden und die Wettbewerbsfähigkeit Europas zu sichern.

Heute erwartet uns eine so umfassende und vielfältige Palette an Vorträgen und Diskussionen, die uns die Komplexität und Bedeutung des Critical Raw Materials Act aus unterschiedlichen Perspektiven näherbringen werden. Die Beiträge spiegeln die Breite des Themas wider und zeigen, wie wichtig es ist, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik gemeinsam an einen Tisch zu bringen, um die Herausforderungen des europäischen Gesetzes zu kritischen Rohstoffen zu meistern. Ein besonderer Fokus liegt auf den finanziellen und strategischen Instrumenten, die den Aufbau einer nachhaltigen Rohstoffversorgung unterstützen. Die Diskussion über Fördermechanismen und Investitionen in kritische Rohstoffprojekte wird aufzeigen, wie die erforderlichen Ressourcen mobilisiert werden können, um Innovationen zu fördern und die Wirtschaft zu stärken. Gleichzeitig werden wir über die Chancen und Herausforderungen sprechen, die der Critical Raw Materials Act für Deutschland birgt – von der Umsetzung bis hin zu den Hemmnissen, die überwunden werden müssen, um die Ziele des Gesetzes erfolgreich zu erreichen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf den regionalen und praktischen Aspekten der Rohstoffgewinnung. Wir werden Beispiele aus verschiedenen Regionen Deutschlands betrachten, die aufzeigen, wie der Critical Raw Materials

Act auf lokaler Ebene umgesetzt werden kann. Dazu gehören innovative Projekte, die die Gewinnung strategischer Rohstoffe in Deutschland vorantreiben, wie die Erschließung von Kupferlagerstätten oder die Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern. Diese Initiativen sind nicht nur wirtschaftlich bedeutsam, sondern tragen auch dazu bei, die Umweltbelastung zu minimieren und nachhaltige Praktiken zu fördern. Die Technologie spielt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung des europäischen Gesetzes zu kritischen Rohstoffen. Wir werden uns mit den neuesten Entwicklungen in der Rohstoffexploration und -aufbereitung auseinandersetzen – von der aerogeophysikalischen Erkundung bis hin zu innovativen Aufbereitungsmethoden. Moderne Technologien wie die aerogeophysikalische Erkundung ermöglichen eine effizientere und präzisere Identifizierung mineralischer Ressourcen, wodurch sich die Exploration kritischer Rohstoffe optimieren lässt. Gleichzeitig arbeiten Wissenschaft und Industrie daran, innovative Aufbereitungsmethoden zu entwickeln, die die Effizienz steigern und den ökologischen Fußabdruck minimieren.

Ich möchte allen Referentinnen und Referenten, den Organisatoren sowie meinen Kollegen Gerhard Pfaff, Reinhard Greiling, Christoph Hilgers und Axel Müller herzlich für ihre engagierte Mitwirkung danken. Es ist ihre Leidenschaft und ihr Wissen, die den Weg zur Lösung dieser komplexen Problematik ebnen. Ich bin zuversichtlich, dass das heutige Kolloquium wertvolle Erkenntnisse und neue Perspektiven eröffnen wird. Die Verbindung zwischen Theorie und Praxis, zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie zwischen politischer Strategie und technologischem Fortschritt ist der Schlüssel zu einer erfolgreichen Umsetzung des Critical Raw Materials Act. Lassen Sie uns diese Gelegenheit nutzen, um diese Verbindungen zu stärken und gemeinsam an einer nachhaltigen Zukunft zu arbeiten. Im Namen der Leibniz-Sozietät wünsche ich Ihnen ein anregendes und produktives Kolloquium. Ich hoffe, Sie gehen mit neuen Ideen und Impulsen nach Hause, die Sie in Ihrer täglichen Arbeit inspirieren werden.

Verordnung über kritische Rohstoffe der EU (CRMA) – Chancen und Herausforderungen

Christoph Hilgers (MLS), Melike Yildirim, Jasemin A. Ölmez
*(Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Karlsruhe)*¹

Abstract

This article aims to address several aspects of Act (EU) 2024/1252, also known as the Critical Raw Materials Act (CRMA), which came into force on 23 May 2025. The CRMA establishes a framework to ensure a secure and sustainable supply of raw materials. The CRMA requires timely transposition into national law, particularly to enhance the security of supply for strategic raw materials. According to the CRMA, by 2030, 10% of the EU's demand for strategic raw materials must be extracted through mining within the EU, 40% must be processed within the EU and 25% must be secured through recycling. Additionally, the import of raw materials from third countries must be diversified if more than 65% of the EU's consumption originates from a single country. To achieve this, procedures must be simplified and processes accelerated. The CRMA also introduces product-specific labelling and information obligations for manufacturing industries to enable the traceability of strategic raw materials in products. It is hoped that the CRMA will lead to measures that will ensure the availability of raw materials and resilient supply chains that can deliver in the foreseeable future. The CRMA's targets for streamlining procedures and achieving its 2030 goals are

¹ KIT - Institut für Angewandte Geowissenschaften, Adenauerring 20a, Karlsruhe Institut für Technologie, Adenauerring 20a, 76131 Karlsruhe

desirable. However, it remains to be seen whether the additional bureaucratic burden on manufacturing industries will actually help secure raw materials for the EU.

Resümee

In diesem Beitrag sollen einige Aspekte der am 23.5.2025 in Kraft getretenen Verordnung 2024/1252 der EU27 zur „Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit Rohstoffen“ (Critical Raw Materials Act – CRMA) adressiert werden. Der CRMA bedingt die fristgemäße Umsetzung in nationales Recht, insbesondere um die Versorgungssicherheit mit strategischen Rohstoffen zu erhöhen. Der CRMA gibt vor, bis 2030 einen Anteil von 10% des EU-Verbrauchs an strategischen Rohstoffen durch Bergbau innerhalb der EU zu gewinnen, 40% sollen in der EU prozessiert und 25% durch Recycling sichergestellt werden. Der Rohstoffimport von Drittländern ist zudem zu diversifizieren, wenn mehr als 65% des EU-Verbrauchs aus einem einzigen Land geliefert werden. Dazu sollen Verfahren vereinfacht und Prozesse beschleunigt werden. Ebenso gibt der CRMA auch produktspezifische Kennzeichnungs- und Informationspflichten des produzierenden Gewerbes vor, um strategische Rohstoffe in Produkten nachverfolgen zu können. Es bleibt zu hoffen, dass der CRMA zu Maßnahmen führt, die in absehbarer Zeit zur sicheren Verfügbarkeit von tatsächlich vorhandenen Rohstoffen mit resilienter Lieferketten führt. Die Vorgaben des CRMA zur Beschleunigung von Verfahren und Prozessen sind ebenso wie die bis 2030 zu erreichenden Ziele wünschenswert. Ob der zusätzliche bürokratische Aufwand für das produzierende Gewerbe dazu beiträgt, Rohstoffe für die EU zu sichern, bleibt abzuwarten.

Keywords/Schlüsselwörter

Critical raw materials acts, manufacturing industries, geopolitics, security politics;

Kritische Rohstoffe Verordnung, produzierendes Gewerbe, Geopolitik, Sicherheitspolitik

1 Einleitung

Die neue Verordnung der EU, der Critical Raw Materials Act (CRMA), hat das Thema einer resilienten Rohstoffversorgung Europas auf die

höchste politische Agenda gebracht. Der CRMA gibt enge Vorgaben zur Erhöhung des Anteils an strategischen Rohstoffen durch Bergbau, Raffination, Produktion, Diversifizierung und Recycling in Europa.

Die Rohstoffversorgung Europas und Deutschlands steht vor zunehmend größer werdenden Herausforderungen, den Zugang zu kritischen Rohstoffen für die Produktion sicherzustellen. Aktuell ist die Lieferung von schweren Seltenen Erden aus China, wo man sich hinsichtlich Raffination ein Monopol erarbeitet hat, in die EU und nach Deutschland eingeschränkt und führt aktuell zu Produktionseinschränkungen und -ausfällen. Betroffen von den gegenwärtigen Engpässen sind nicht nur Produkte des täglichen Gebrauchs, Windkraftanlagen u.a., sondern auch Produkte für die nationale Sicherheit.

Entsprechend der absehbaren Entwicklungen eines zunehmenden Wettbewerbs um Rohstoffe (vgl. z. B. Hilgers et al. 2021 u.v.a.m.) ergriffen bspw. die USA Maßnahmen zur Rohstoffsicherung, obwohl in der USA im Gegensatz zur EU national Bergbau auf Seltene Erden betrieben wird und die USA international operierende Bergbauunternehmen beheimaten. Dazu zählen bspw. Albermarle (Li, Br u.a., Marktkapitalisierung 30 Mrd. USD), Alcoa (Al, 6,3 Mrd. USD), MP Metals (Seltene Erden, 5,8 Mrd. USD), Newmont (Au, Cu, Ag, Pb, Zn, 36 Mrd. USD), Southern Copper (Co, Mo, Zn, Ag, 57 Mrd. USD), Freeport.McMoRan (Cu, Au, Mo, 60 Mrd. USD) (vgl. Ashcroft 2026). Auch das US-Verteidigungsministerium Department of Defense (DoD) finanziert aktiv den Aufbau von Rohstoff-Lieferketten, da bei Rohstoffmangel die nationale Sicherheit und die Verteidigungsfähigkeit gefährdet ist.

In Deutschland und der EU nehmen international operierende Firmen zu Metallexploration und Produktion weiter ab. Global operierende Bergbau-Unternehmen wie Preussag und Metallgesellschaft wurden um die 2000er Jahre umstrukturiert und abgewickelt, andere deutsche Unternehmen verkauften ihre Lagerstätten. Auch die Verarbeitung von Metallen ist in Deutschland gegenläufig zum globalen Trend rückläufig (vgl. Hilgers & Busch 2024; Abb. 10).

Große Konzerne nutzen unterschiedliche Strategien, um ihren Bedarf an Rohstoff-Mengen und -qualitäten für ihre Produkte, angepasst an die Nachfrage (Raten) bei möglichst geringen Kosten zu gewährleisten. BMW beispielsweise sichert seinen Rohstoffzugang durch Lieferverträge und Partnerschaften wie zu Kobalt mit Firmen in Australien und

Marokko, oder Lithium mit Firmen in Australien und Argentinien.

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen ist essentiell zum Erhalt der Lebensgrundlagen, für industrielle Produktion und technologischen Fortschritt. Dennoch haben Rohstoffe, in der deutschen Sprache auch Bodenschätze genannt, in Europa ein schlechtes Image. Die Weltbevölkerung und damit die Menge an Konsumenten wird nach Szenarien der Weltbank bis in die 2080er Jahre um weitere ca. 2 Mrd. Menschen wachsen und damit auch die Nachfrage nach Rohstoffen (und Energie) steigen (vgl. Hilgers & Busch 2024, Abb. 2). Auch für die 17 Nachhaltigkeitsziele der UN, zu denen sich 2015 193 Länder verpflichtet haben und die 2030 erreicht werden sollen, sind ebenso wie die in Europa forcierte Energiewende, Mobilitätswende und andere Ambitionen ohne ein Mehr an Rohstoffen nicht erreichbar. Ebenso ist die nationale Sicherheit ohne resiliente Lieferketten von Rohstoffen (und Energie) nicht zu gewährleisten.

Die Gewinnung von Rohstoffen und deren Verarbeitung kann Wohlstand schaffen, wie es Länder wie Deutschland, ursprünglich fokussiert auf den Bergbau, demonstrierten. Sie geht jedoch mit einer Änderung des Umfelds einher, die soziale-, technologische-, ökonomische-, ethisch-, legal/gesetzliche-, politische-, Umwelt- und geologische Aspekte berücksichtigen muss. Diese Umfeldanalyse wird als STEEL-PEG zusammengefasst und in Hilgers (2025) erläutert. Grundlage für die energieintensive Gewinnung und Raffination von Rohstoffen ist bezahlbare Energie sowie klar definierte und überprüfbare Umwelt- und Klimastandards. Eine Herausforderung der Umfeldanalyse ist die häufig globale Lieferkette von der Rohstoffgewinnung über die Raffination zum Halbzeug (vgl. z. B. Ölmez & Hilgers 2023).

Rohstoffe sind nicht ausschließlich im freien Markt verfügbar und handelbar. Sie kommen nur an geologisch bestimmten Orten als Lagerstätten in ausreichender Konzentration oder als Beiprodukt bei der energieintensiven Raffination vor. Rohstoffe werden zunehmend von Ländern, die Bergbau bzw. Raffination betreiben, global zur Durchsetzung politischer Interessen eingesetzt, wenn diese sich ein Monopol erarbeitet haben.

Die Nachfrage nach Rohstoffen von hoher wirtschaftlicher Bedeutung mit hohem Versorgungsrisiko steigt kontinuierlich. Ebenso steigen die Herausforderungen zur Sicherung der Rohstoffverfügbarkeiten. Daher ist die Verordnung der EU27 zur „Schaffung eines Rahmens zur

Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit Rohstoffen“ (Critical Raw Materials Act CRMA) durch die am 23.5.2025 in Kraft getretene Verordnung 2024/1252 wichtig.

Im Folgenden werden einige Aspekte des CRMA behandelt. Es wird kritisch diskutiert, ob die Verordnung in der vorgegebenen Zeit bis 2030 tatsächlich zu einem Mehr an sicher verfügbaren Rohstoffen führt. Ebenso wird dargelegt, dass insbesondere für das produzierende Gewerbe durch den CRMA ein neuer, erhöhter bürokratischer Aufwand ansteht.

2 Kritische und strategische Rohstoffe

2.1 Anzahl kritischer Rohstoffe wächst

Kritische Rohstoffe sind von hoher ökonomischer Relevanz und mit einer hohen Wahrscheinlichkeit der Lieferketten-Unterbrechung. Entsprechend werden Rohstoffe für die EU von der der DG GROW und für Deutschland von der Bundesgesellschaft für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR regelmäßig bewertet. Die Liste der bewerteten Rohstoffe und die Anzahl der identifizierten potentiell kritischen Rohstoffe nehmen kontinuierlich zu (Tabelle 1).

Jahr	untersucht	davon kritisch	Jahr	untersucht	davon kritisch
2010	41	14	2019	89	30
2016	78	27	2023	87	34

Tab. 1: Liste der potentiell kritischen Rohstoffe in der EU (vgl. EU 2023).

Die strategischen Rohstoffe sind eine Teilmenge der kritischen Rohstoffe (Tabelle 2) und werden anhand von Parametern ermittelt. Ein kritischer Rohstoff hat eine hohe wirtschaftliche Bedeutung und ein erhöhtes Versorgungsrisiko. Ein strategischer Rohstoff wird definiert als „... Bedeutung eines Rohstoffs für den grünen und den digitalen Wandel sowie für Verteidigungs- und Raumfahrtanwendungen ...“ (vgl. EU 2024).

Kritische Rohstoffe der EU, Stand 2024
Antimon, Arsen, Bauxit/Aluminiumoxid/Aluminium, Baryt, Beryllium, Bismut, Bor, Kobalt, Kokskohle, Kupfer, Feldspat, Flussspat, Gallium, Germanium, Hafnium, Helium, Schwere seltene Erden, Leichte seltene Erden, Lithium, Magnesium, Mangan, Graphit, Nickel – Batteriequalität, Niob, Phosphatgestein, Phosphor, Metalle der Platingruppe, Scandium, Siliziummetall, Strontium, Tantal, Titanmetall, Wolfram, Vanadium
Strategische Rohstoffe der EU, Stand 2023
Bauxit/Aluminiumoxid/Aluminium, Bismut, Bor – metallurgische Qualität, Kobalt, Kupfer, Gallium, Germanium, Lithium – Batteriequalität, Magnesiummetall, Mangan – Batteriequalität, Graphit – Batteriequalität, Nickel – Batteriequalität, Metalle der Platingruppe, Seltenerdmetalle für Magnete (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm und Ce), Siliziummetall, Titanmetall, Wolfram sowie Feldspat und Kokskohle

Tab. 2: Liste der strategischen und kritischen Rohstoffe der EU nach dem CRMA (EU 2023, 2024).

2.2 Dauer bis zur Produktion von entdeckten Bodenschätzen steigt

Die Dauer von einer entdeckten Lagerstätte bis zum Beginn der Rohstoffförderung steigt. Für Bergbau, der zwischen 2020-2023 in Betrieb ging, lag die Dauer bei durchschnittlich 18 Jahren und damit 5 Jahre mehr als für Bergbaubetriebe, die 15 Jahre früher in Betrieb gingen (vgl. Manalo 2024). Die Dauer hängt von Land, Rohstoff, Marktentwicklung, Kapitalzugang und zunehmend wachsenden Auflagen ab (vgl. Khan et al. 2016), nicht aber von einem Mangel an Rohstoffen.

2.3 Der Rohstoffbedarf steigt

Der globale Energie- und Rohstoffbedarf wird durch eine wachsende Weltbevölkerung bei steigendem Wohlstand, neuen Technologien wie Digitalisierung, KI u.a. zunehmen. Der Ausbau großtechnischer Energiewandel-Anlagen wie Windkraft und Photovoltaik, der geplante Um-

und Ausbau des Stromnetzes, die Entwicklung einer möglichen Speicherinfrastruktur zur Kompensation der fluktuierenden Energieerzeugung durch Wind und Sonne, der geplante Technologiewandel wie Elektromobilität u.a. bedingen einen zusätzlich wachsenden Energie- und Rohstoffbedarf. Gregoir et al. (2022) schätzten den global benötigten Zuwachs an Metallen zwischen 2020 und 2050 für die CleanEnergy Technologien für zwei Szenarien ab (STEPS [stated policies scenario] – gegenwärtige Klimaambitionen werden fortgeschrieben, SDS [sustainable development scenario] – verstärkte Klimaambitionen). Für das SDS-Szenario ermittelten sie einen Mehrbedarf für Lithium (2109%), Dysprosium (433%), Kobalt (403%), Tellurium (277%), Scandium (204%), Nickel (168%), Praseodym (110%), Gallium (77%), Neodym (66%), Platin (65%) etc. (vgl. Gregoir et al. 2022, Hilgers & Busch 2023; Abb. 2).

3 Die Vorgaben des CRMA zu Bergbau, Verarbeitung und Recycling

Der in Kraft getretene Critical Raw Materials Act (CRMA) forciert die Nutzung eigener Ressourcen und eine Diversifizierung, die auf Ebene der EU-Staaten bis 2030 erreicht werden soll. Ein Anteil von 10% des EU-Verbrauchs an strategischen Rohstoffen (Tab. 1) soll in der EU gefördert, 40% in der EU prozessiert und 25% durch Recycling bis 2030 sichergestellt werden (vgl. EU 2024). Zudem ist der externe Bezug aus Drittländern zu diversifizieren, wenn mehr als 65% des EU-Verbrauchs aus einem einzigen Land geliefert werden (Bergbau, Verhüttung, Raffination) (vgl. EU 2024). Der CRMA gibt einen Rahmen vor, der in nationales Recht umzusetzen ist.

Um die Vorgaben des CRMA zu erreichen, werden konkrete Richtlinien vorgelegt. Projekte mit Bezug zu strategischen Rohstoffen sollen eine Behörde als Anlaufstelle haben, die Dauer der Genehmigungsverfahren wird mit 27 Monaten für die Gewinnung und 15 Monaten für Recycling und Verarbeitung vorgegeben. Ebenso soll die Dauer von Umweltprüfungen limitiert werden (vgl. z. B. Franßen & Homann 2024).

In Abbildung 1 werden in der EU durch Bergbau und Verarbeitung bereitgestellte Rohstoffe sowie deren Verfügbarkeit durch Recycling (EOL – RIR end of life recycling input rate) nach EU (2023a) und die Vorgaben des CRMA für 2030 dargestellt. Die von der EU identifizierten

strategischen Rohstoffe (rot gekennzeichnet) bilden eine Teilmenge der kritischen Rohstoffe (rot und grün gekennzeichnet (Abbildung 1). Bei manchen strategischen Rohstoffen wie Seltene Erden, Titanmetall u.a. liegen die gegenwärtigen Daten zu Bergbau, Verarbeitung und Recycling noch deutlich unterhalb der Vorgaben, die laut CRMA in den nächsten 5 Jahren bis 2030 erreicht werden sollen (vgl. z. B. Koese et al. 2025).

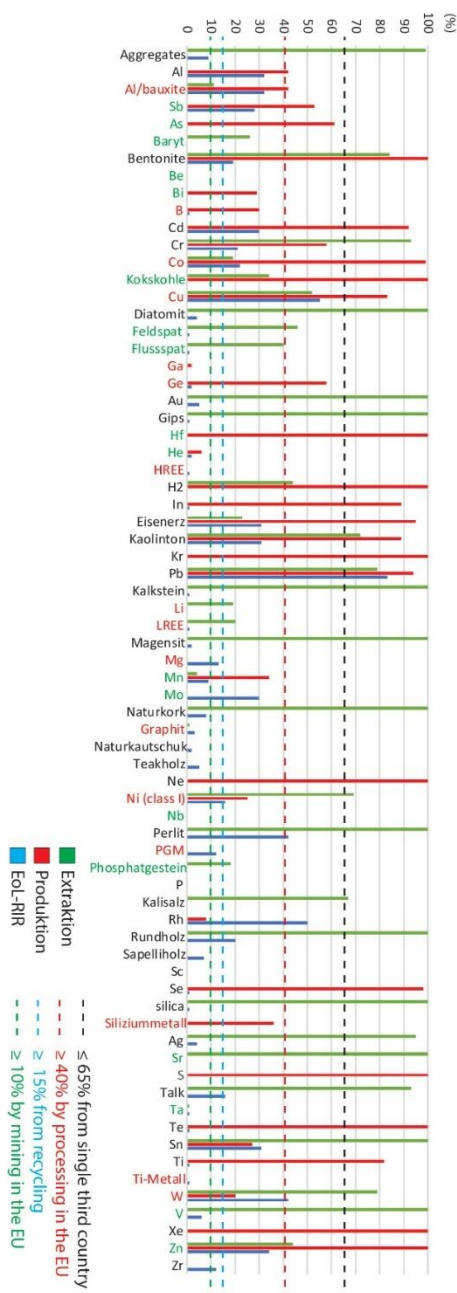


Abb. 1: Abhängigkeit der EU nach Rohstoffen. Extraktion in der EU (grün), Aufbereitung (processing) in der EU (rot) und Lebensende-Reyclingin-putrate (EoL-RIR) in der EU (rot). Strategische Rohstoffe sind in Rot, die kritischen Rohstoffe in Grün und Rot dargestellt. Die bis 2030 gemachten Vorgaben des CRMA für die strategischen Rohstoffe sind für Bergbau, Recycling, Verarbeitung in der EU sowie der Diversifizierung von Rohstoffen als gestrichelte Linien gekennzeichnet (vgl. EU 2023 S. 31, 32).

4 Implikationen des CRMA für produzierende Gewerbe in der EU

Der CRMA beinhaltet eine **Kennzeichnungspflicht**, welche für die Unternehmen für entsprechende Produkte mit kritischen Rohstoffen vorgegeben wird. Die Kennzeichnung ist deutlich sichtbar durch ein unverwischbares Etikett an Produkten anzubringen, die eine relevante Menge an strategischen Rohstoffen enthalten. Dies betrifft zunächst Produkte mit Dauermagneten und ist zwei Jahre nach Inkrafttreten des CRMA umzusetzen. Die Kennzeichnung muss das Produktlebensende mindestens 10 Jahre überdauern und bei Dauermagneten mit NdFeB, SmCo, AlNiCo oder Ferrit Informationen auf einem Datenträger abgelegt werden. Ebenso wird für Produkte, die mehr als 200 g Dauermagneten enthalten, eine **Informationspflicht** vorgegeben, die produktspezifisch in 2 bis 5 Jahren nach Inkrafttreten des CRMA durch die Unternehmen zu leisten ist. Die Informationen müssen bis 10 Jahre nach Produktlebensende sowie auch nach Insolvenz des Produzenten Kontaktdaten, chemische Zusammensetzung und Informationen über Zugang und Entfernung der Dauermagnete im Produkt enthalten (vgl. Franßen & Homann 2024).

Mit den neuen Pflichten für das produzierende Gewerbe soll das geplante Recycling in der EU erleichtert werden. Es führt aber zunächst nicht zu mehr Rohstoffen, da Recyclingmöglichkeiten bspw. für REE (noch) fehlen. Recyclingkapazitäten sollen in der EU aufgebaut werden, die dann zu wettbewerbsfähigen Preisen Sekundärrohstoffe anbieten müssten. Gleichzeitig wird sich der globale Bedarf an Seltenen Erden wie Dy, Pr, Nd, Tb für die CleanTech bis 2040 etwa auf 121 kt/a verdoppeln (vgl. IEA 2024). Die Bergbauförderung von Seltenerdoxiden (REO) betrug 2023 350 kt/a und stieg 2024 auf 390 kt/a (vgl. USGS 2024, 2025). Eine Verdopplung des Bedarfs für Cleantech und eine kontinuierliche Steigerung des Gesamtbedarfs kann neben einer Kreislaufwirtschaft mit Recycling nur durch mehr Bergbau auf Rohstoffe gedeckt werden.

Eine detaillierte Einschätzung des neuen bürokratischen Aufwands, der vom produzierenden Gewerbe in absehbarer Zeit zu bewältigen ist, wird in Franßen & Homann (2024) ausführlich erläutert.

6 Diskussion und Schlussfolgerung

Aktuell sind die Exporte von schweren Seltenen Erden, bei denen China sich hinsichtlich Raffination ein globales Monopol von 100% erarbeitet hat, eingestellt worden. Ein Mangel solcher Rohstoffe hat wirtschaftspolitische und sicherheitspolitische Implikationen. Schwere Seltene Erden wie Dysprosium, Terbium u.a. sind nicht nur für Windkraftanlagen und Elektromotoren essentiell, sondern auch für die nationale Sicherheit wie Radar, Lasersysteme, Nachtsichtgeräte, Düsentriebwerke und anderes.

Die USA begegnen dem zunehmenden Wettbewerb um Rohstoffe mit wirtschafts-, geo- und sicherheitspolitischen Maßnahmen wie direkten Investitionen in rohstoffreichen Ländern (z. B. Saudi-Arabien, Ukraine, u.a.) und dem Wiederaufbau eigener Rohstoffkompetenz in den USA (z. B. SEE-Mine Mountain Pass, Aufbau von SEE-Raffination in den USA). Auch das US-Verteidigungsministerium investiert in Rohstoffe und Lieferketten, um alternative Produktionskapazitäten aufzubauen und das für die Rohstoffgewinnung notwendige Wissen wieder zu entwickeln (vgl. z. B. DoD 2021, 2024, 2025, NETL 2022).

Der CRMA gibt einen wichtigen Anstoß, die Versorgung strategischer Rohstoffe für Europa resilienter zu gestalten. Auch wenn die Vorgaben bis 2030 eng gefasst und für manche strategischen Rohstoffe kaum erreichbar sind, unterstreicht der CRMA die Bedeutung von Rohstoffen für Europa. Der CRMA enthält zudem Vorgaben zur Kennzeichnungs- und Informationspflicht, die in wenigen Jahren vom produzierenden Gewerbe zu leisten sind. Damit steigt der bürokratische Aufwand, ohne dass dadurch zunächst (Sekundär)Rohstoffe gewonnen worden ist.

Die Resilienz der europäischen und deutschen Rohstoffversorgung sollte durch Maßnahmen begleitet werden, die zu den notwendigen Rohstoffmengen führen und mit resilienten Lieferketten einhergehen. Nicht die Summe an Regularien und Auflagen des CRMA, sondern das Vorhandensein der tatsächlichen Rohstoffmengen und -qualitäten beim produzierenden Gewerbe in Europa ist ausschlaggebend für den wirtschaftspolitischen Erfolg, bei dem Kreislaufwirtschaft und Recycling einen Beitrag leisten, den Bedarf aber ohne Bergbau nicht decken können.

Bergbau und Raffination bleiben auch in Zukunft unerlässlich, Rohstoffmengen und Rohstoffqualitäten bereitzustellen. In beiden Segmenten verliert die EU weiterhin national und international operierende Firmen und Produktionskapazität.

Bibliographie

- Ashcroft, Sean (2024): *Top 10 US-based mining companies*. MiningDigital, <https://miningdigital.com/top10/top-10-us-based-mining-companies>.
- EU (2023): *European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report*. 155 S., <https://ec.europa.eu/newsroom/cipr/items/787007/en>.
- EU (2024): *Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.4.2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252.
- Franßen, Georg; Homann, Vanessa (2024): *Critical Raw Materials Act – Chancen und Risiken für die deutsche Wirtschaft*. Think Tank Industrielle Ressourcenstrategien, 32 S., https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2024/06/RZ_THINKTANK_CRMA_A4_DE_web-1.pdf.
- Gregoir Liesbet; van Acker, Karel (2022): *Metals for clean energy*. 116 S., <https://eurometaux.eu/metals-clean-energy/?msclid=f9b3f7facf0311ecafd498b57bceb700>.
- Hilgers, Christoph; Kolb, Jochen; Becker, Ivy (2021): *Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient? Bergbau – Verhüttung – Recycling*. ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien, 72 S., https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Hilgers_Kolb_Becker_2021_THINKTANK_Brosc.pdf.
- Hilgers, Christoph; Busch, Benjamin; Ölmez, Jasemin (2023): *Klima, Rohstoffverfügbarkeit und Energiewende – Deutschland in der Krise?* Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, 163, 21-55, <https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2024/01/SB159.pdf>.
- Hilgers, Christoph; Busch, Benjamin (2024): *Rohstoffbewusstsein und geostrategische Rohstoffsicherung*. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät

- der Wissenschaften zu Berlin, 163, 21-55, https://leibniz-sozietat.de/wp-content/uploads/2024/12/01_Band-SB163.pdf.
- Hilgers, Christoph (2025): Rohstoffbedarf, Energie und Klima. In: *Handbuch Rohstoffwirtschaft*. Frenz, Walter (Hrsg.): 55-110, doi <https://doi.org/10.37307/b.978-3-503-23745-6>.
- IEA (2024): *Rare earth elements – outlook for key energy transition minerals*. <https://www.iea.org/reports/rare-earth-elements>.
- Khan, Themina; Nguyen, Trang; Ohnsorge, Franziska; Schodde, Richard (2016): From commodity to production. *Policy Research Working Paper 7823*, World Bank, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/573121473944783883/pdf/WPS7823.pdf>.
- Koese, Maarten; Parzer, Michael; Sprecher, Benjamin; Kleijn, René (2025): *Self-sufficiency of the European Union in critical raw materials for E-mobility. Resources, Conservation and Recycling*, 212, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108009>.
- Manelo, Paul (2024): Average lead time almost 18 years for mines started in 2020-2023. S&P Global, *Pressemitteilung vom 10.4.2024*, <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/average-lead-time-almost-18-years-for-mines-started-in-2020-23>.
- National Energy Technology Laboratory (2022): NETL-supported REE from coal ash technology development attracts new support from DOD. *Pressemitteilung vom 2.3.2022*, <https://www.netl.doe.gov/node/11574#:~:text=U.S.%20Department%20of%20Defense%20%28DOD%29%20progress%20on%20a,and%20private%20partner%20%E2%80%93%20Physical%20Sciences%20Inc.%20%28PSI%29>.
- Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph (2023): *Rohstoffe für Deutschland und die Auswirkungen des Russland-Ukraine Konflikts. ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien*, 54 S., https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2024/01/RZ_THINKTANK_US_UKR_A4_DE_12I23.pdf.
- US Department of Defense (2021): DOD Announces Rare Earth Element Award to strengthen domestic industrial base. *Pressemitteilung vom 1.2.2021*, <https://www.defen-e.gov/News/Releases/Release/Article/2488672/dod-announces-rare-earth-element-award-to-strengthen-domestic-industrial-base>.

- US Department of Defense (2024): DOD looks to establish 'Mine-to-Magnet' Supply Chain for Rare Earth Materials. *Pressemitteilung vom 11.3.2024*, <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3700059/dod-looks-to-establish-mine-to-magnet-supply-chain-for-rare-earth-materials/>.
- US Department of Defense (2024): Department of Defense Awards \$5.1 Million to Recover Rare Earth Elements from recycled electronic waste. *Pressemitteilung vom 17.1.2025*, <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/4033048/departement-of-defense-awards-51-million-to-recover-rare-earth-elements-from-rec/>.
- USGS (2024): *Mineral commodities summaries 2025*. 211 S., <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>.
- USGS (2025): *Mineral commodities summaries 2025*. 212 S., <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>.

Critical Raw Materials Act – Chancen, Umsetzung und Hemmnisse für Deutschland aus Sicht des Verbandes Bergbau, Geologie und Umwelt e.V.

Olaf Alisch

(Berlin)

Abstract

The German Mining, Geology and Environment Association (Verband Bergbau, Geologie und Umwelt e.V.) has mining projects from member companies, particularly for critical and strategic raw materials, in accordance with EU criteria. These include the raw materials copper and lithium. With the Critical Raw Materials Act from 2024, the EU is pursuing the goal of making the EU more independent and crisis-proof in the supply of critical raw materials. To this end, there are certain requirements that must be implemented in the EU member states. Strategic projects make a significant contribution to securing the EU's supply of strategic raw materials and are of public interest. These are to be categorised in the EU member states with the highest possible national importance. This also applies to the authorization procedures and, for example, the duration of the procedures. For strategic projects, the authorization procedure may take a maximum of 27 months (excluding the EIA). According to the EU Commission, recognition as a strategic project was granted in spring 2025. What opportunities does this present for Germany with regard to the extraction of domestic raw materials and what experiences have been made with the application and progress in the application of the CRMA for raw materials projects in the German Mining, Geology

and Environment Association? This and the obstacles that mining projects in Germany have to overcome will also be discussed in the presentation, as well as the conclusions that can be drawn from this.

Resümee

Mitgliedsunternehmen des Verbandes Bergbau, Geologie und Umwelt e.V. entwickeln Bergbauprojekte, insbesondere für kritische und strategische Rohstoffe, nach EU-Kriterien. Dazu zählen u.a. die Rohstoffe Kupfer und Lithium. Die EU verfolgt mit dem Critical Raw Materials Act (CRMA) aus dem Jahr 2024 das Ziel, die EU unabhängiger und krisensicherer in der Versorgung mit kritischen Rohstoffen zu machen. Dazu gibt es bestimmte Anforderungen, die in den EU-Mitgliedsländern umzusetzen sind. Dabei leisten strategische Projekte einen bedeutenden Beitrag zur Versorgung der EU mit strategischen Rohstoffen. Diese Projekte sind in den Mitgliedsstaaten der EU mit einer höchstmöglichen nationalen Bedeutung einzuordnen. Das betrifft auch die Genehmigungsverfahren und die Dauer der Verfahren. Bei strategischen Projekten darf das Genehmigungsverfahren maximal 27 Monate (ausgenommen die UVP) dauern. Eine Anerkennung als strategisches Projekt erfolgte gemäß EU-Kommission im Frühjahr 2025. Welche Chancen ergeben sich dadurch für Deutschland in Bezug auf die Gewinnung heimischer Rohstoffe und welche Erfahrungen gibt es nun bei der Beantragung bzw. den Fortschritten in der Anwendung des CRMA bei den Rohstoffprojekten im Verband Bergbau, Geologie und Umwelt e.V.? Darüber und über die Hemmnisse, die Bergbauprojekte in Deutschland zu überwinden haben, wird ebenso im Vortrag eingegangen, wie dem Aspekt, welche Schlussfolgerungen daraus gezogen werden können.

Keywords/Schlüsselwörter

Critical Raw Materials Act (CRMA), critical and strategic raw materials of VBGU members, strategic projects, opportunities for domestic raw materials, obstacles, experiences;

CRMA der EU, kritische und strategische Rohstoffe der VBGU-Mitglieder, strategische Projekte, Chancen für heimische Rohstoffe, Hemmnisse, Erfahrungen.

1 Einleitung: Kurzvorstellung Verband Bergbau, Geologie und Umwelt e.V. (VBGU)

Der Verband wurde 1990 gegründet und ist seit dem 17. März 2022 im Lobbyregister des Bundestages unter der Registrier-Nr. R 003576 eingetragen (vgl. Lobbyregister beim Deutschen Bundestag 2025). Der Geschäftsführende Vorstand des Verbandes besteht aus dem Präsidenten, Dipl.-Ing. Jens-Peter Lux (DMT GmbH & Co KG), dem Vizepräsidenten, Dr. Michael Paul (Wismut GmbH) und dem Schatzmeister, Nici Hoppe (Bergsicherung Ilfeld GmbH & Co KG). Dem Vorstand gehören weitere 5 Geschäftsführer von Mitgliedsunternehmen des VBGU und dem Geschäftsführer des Verbandes Olaf Alisch (bis zu seinem Ausscheiden am 31. Mai 2025) an. Abbildung 1 zeigt VBGU-Geschäftsstelle in Berlin.



Abb. 1: Die VBGU-Geschäftsstelle in der Poststraße im Berliner Nikolaiviertel (Copyright O. Alisch).

1.1 Politikkontakte

Die Registrierung des VBGU im Lobbyregister des Bundestages ermöglicht es dem Verband, Politikkontakte aktiv zu betreiben und den Mitgliedern den Direktzugang zur Bundes- und auch Landespolitik zu gewähren. Die Durchführung Parlamentarischer Abende zu aktuellen Themen ist eine Möglichkeit, diese Kontakte herzustellen.

1.2 Struktur des Verbandes

Abbildung 2 zeigt die Struktur des VBGU. Erkennbar ist, wie die 3 Säulen des Verbandes – Bergbau, Geologie und Umwelt – untereinander vernetzt sind.

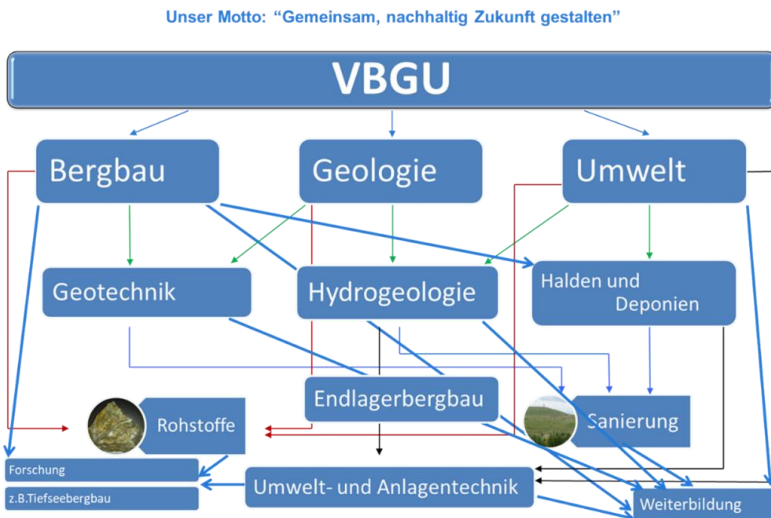


Abb. 2: Schema zur Struktur des VBGU.

1.3 Hauptgeschäftsfelder

Der VBGU ist ein Arbeitgeberverband mit derzeit 60 Mitgliedsunternehmen aus dem KMU-Bereich. Der Verband hat in seiner Struktur Säulen bzw. Hauptgeschäftsfelder, deren Grenzen untereinander aber auch fließend sein können.

Mitgliedsunternehmen sind derzeit tätig als bzw. in den Bereichen:

- Bergbauunternehmen, Rohstoffgewinnung, Bergbau Projekte
- Altbergbau / Bergbausicherheit / Bergsicherungsunternehmen / Endlagerbergbau
- Consulting-Unternehmen, Geotechnik-Unternehmen, Umweltdienstleistungen
- Spezialleistungen (z.B. Schachtbau, Bohrunternehmen, Erneuerbare Energien, Unternehmen im Bereich Umwelttechnik)
- Uranbergbau-Sanierungsgesellschaft und
- Kalihaldenbetreiber.

Im Bereich Bergbau sind Bergwerksbetreiber und Bergbau-Projekte in der Rohstoffgewinnung zusammengefasst. Auf letztere bezieht sich der Vortrag zu CRMA im Weiteren.

Das nach der Zahl der Beschäftigten größte Unternehmen ist nach wie vor die Wismut AG.

1.3.1 Bergwerke mit Rohstoffgewinnung

Zu den Bergwerken mit Rohstoffgewinnung gehören:

- DEUSA GmbH – Kalisalzgewinnung im Soleverfahren
- Staatliche Porzellanmanufaktur Meissen GmbH – untertägige Kaolingewinnung.

Die Erzgebirgische Fluss- und Schwerspatwerke EFS mit der untertägigen Flussspatgewinnung ist insolvent und aus dem Verband ausgeschieden. Die EFS wird hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, da es sich bei Flussspat um einen in der EU kritischen Rohstoff handelt.

1.3.2 Bergwerke ohne Rohstoffgewinnung

Zu den Bergwerken des Endlagerbergbaus gehören das Bergwerk Asse, das Erkundungs- und Forschungsbergwerk Gorleben, das Bergwerk Konrad (bestätigtes Endlager für schwach- bis mittelradioaktive Stoffe) und das Bergwerk Morsleben. Zuständiges VBGU-Mitgliedsunternehmen ist hier die BGE-Bundesgesellschaft für Endlagerung in Peine.

1.3.3 Rohstoffgewinnungsprojekte der VBGU-Mitgliedsunternehmen

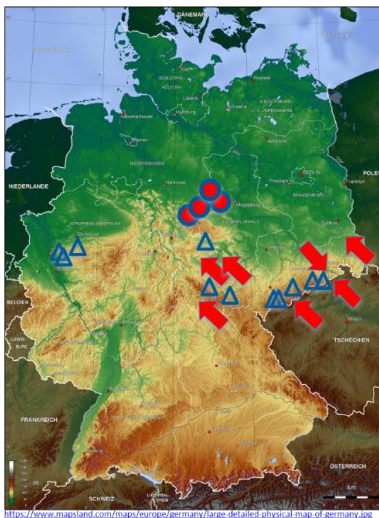
Die nachfolgend aufgeführten Verbandsmitglieder verfolgen Rohstoffgewinnungsprojekte in Deutschland:

- SAXORE Bergbau GmbH /First Tin Projekt Tellerhäuser – Rittersgrün - Zinngewinnung in Sachsen
- Anglo American Exploration Germany GmbH – Kupfererkundung in Deutschland
- Kupferschiefer Lausitz GmbH – Kupfergewinnung in der Lausitz
- Zinnwald Lithium – Gewinnung von Lithium aus Zinnwaldit (Glimmer).

1.3.4 Bergbau, Bergsicherung, Schachtbau

Abbildung 3 zeigt die Lage der Bergwerke und Projekte der VBGU-Mitgliedsunternehmen mit einem roten Pfeil markiert. Der blaue Kreis mit roter Füllung zeigt die Bergwerke, die zur Bundesgesellschaft für Endlagerung gehören. Der Vollständigkeit halber ebenfalls noch gekennzeichnet sind die Bergsicherungs- und Schachtbaumitgliedsunternehmen des VBGU sowie die im Altbergbau tätigen Mitglieder.

Bergbau - Bergbau, Bergsicherung, Schachtbau



⬅ Bergwerke und Bergwerksprojekte

- Staatliche Porzellanmanufaktur Meissen
- DEUSA GmbH
- Zinnwald Lithium GmbH
- Anglo American Exploration Germany GmbH
- Kupferschiefer Lausitz GmbH
- Saxore Bergbau GmbH
- Südharz Kali GmbH

⚠ Bergsicherung, Altbergbau, Schachtbauunternehmen

- Bergsicherung Ilfeld GmbH & Co KG
- Bergsicherung Schneeberg GmbH & Co KG
- Bergsicherung Sachsen GmbH
- Bergsicherung Freital GmbH
- BST Freiberg GmbH
- BTOe GmbH
- CDM Smith GmbH
- DMT GmbH & Co KG
- LMBV mbH
- Redpath Deilmann GmbH
- Thyssen Schachtbau GmbH
- Schachtbau Nordhausen GmbH
- TS Bau Jena GmbH

⬤ Bergwerke BGE Peine

- Asse
- Gorleben
- Konrad
- Morsleben

Stand 07/2024

Abb. 3: Lage ausgewählter Bergwerke und Projekte in Deutschland (Alisch, eingetragen in Landkarte von <https://www.mapsland.com/maps/europe/germany/large-detailed-physical-map-of-germany.jpg>).

2 Critical Raw Materials Act

Bevor die Ziele und Kernpunkte des Critical Raw Materials Act (vgl. CRMA 2024) näher erläutert werden, ist die aktuelle Einordnung in kritische und strategische Rohstoffe vor auszuschicken. Diese zählt 34 Rohstoffe (Schwere und Leichte Seltenen Erden sind dabei zusammengefasst).

Eine genaue Einteilung ergibt folgendes Bild (vgl. CRMA 2024):

Kritische Rohstoffe:

Antimon, Arsen, Baryt, Beryllium, Bor, Feldspat, Flussspat, Graphit, Hafnium, Helium, Koks kohle, Kupfer, Lithium, Magnesium, Mangan, Niob, Phosphor, Phosphatgestein, Scandium, Strontium, Tantal, Vanadium.

Kritische und Strategische Rohstoffe:

Bauxit/Aluminiumoxid/Aluminium, Bismut, Gallium, Germanium, Kobalt, Kupfer, Leichte und Schwere Seltene Erden, Metalle der Platingruppe, Nickel (Batteriequalität), Siliziummetall, Titanmetall, Wolfram.

Strategische Rohstoffe:

Bor (metallurgische Qualität), Graphit (Batteriequalität), Lithium (Batteriequalität) Magnesiummetall, Mangan (Batteriequalität).

2.1 Zielsetzungen

Die EU will mit dem CRMA nachfolgende Ziele erreichen, die hier stichpunktartig aufgeführt werden:

- Stärkung der strategischen Autonomie durch Verringerung der Abhängigkeit der EU von
- Drittländern bei kritischen und strategischen Rohstoffen bis 2030.
- Sicherung der grünen und digitalen Transformation, Verteidigung und Raumfahrt.
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit

Kernpunkte (Bezugsjahr ist 2030):

- 10 % des Bedarfs an strategischen Rohstoffen aus dem EU-Bergbau
- Verarbeitungskapazität für strategische Rohstoffe in Höhe von

- 40 % des EU-Bedarfs
- 15 % (alt) des EU-Bedarfs an strategischen Rohstoffen aus EU-Recycling
- Max. 65 % eines strategischen Rohstoffs aus nur einem Drittland
- Umfassende Erkundung in der EU
- schnellere Genehmigungsverfahren
- NEU: Umfasst jetzt auch Aluminium und synthetischen Graphit
- NEU: 25 % des EU-Bedarfs an strategischen Rohstoffen aus EU-Recycling

Kritische Rohstoffliste (siehe oben) als Grundlage: Eine Überprüfung der Klassifizierung für CRMA erfolgt alle 4 Jahre.

Die Übersicht der EU in Abbildung 4 auf Seite 43 verdeutlicht die Ziele noch einmal anschaulich.

2.2 Chance für Deutschland

Die Übersicht kritischer mineralischer Rohstoffe in Deutschland (Grundlage BGR, 2024) in Abbildung 5 (Seite 44) ist einem Vortrag des Sächsischen Oberberghauptmanns, gehalten auf dem Neujahrsempfang des VBGU im Januar 2025, entnommen. Oberberghauptmann Prof. Cramer zeigt darin Sachsen als Schwerpunkt und Schlüsselgebiet für die Versorgung mit kritischen Rohstoffen (vgl. Cramer 2025).



PRIORITÄTEN SETZEN

Liste der kritischen Rohstoffe

- In der Liste werden die Rohstoffe aufgeführt, die für die gesamte europäische Wirtschaft wichtig sind und bei denen das Risiko von Lieferengpässen hoch ist.

Liste der strategischen Rohstoffe

- In der Liste werden die Rohstoffe aufgeführt, die von hoher strategischer Bedeutung sind und den Prognosen zufolge von globalen Marktungleichgewichten betroffen sind.

FESTLEGUNG VON BENCHMARKS FÜR STRATEGISCHE ROHSTOFFE BIS 2030



Abb. 4: Zielsetzungen der EU im Bereich der kritischen Rohstoffe (Quelle: Europäische Union 2023).

Erzbergbau

Kritische mineralische Rohstoffe in Deutschland (BGR 2024)

- Kritische Rohstoffe
- Lithium
- Kupfer
- ▲ Helium
- Fluss- und Schwerspat
- Feldspat
- Graphit
- Quarz
- Bedeutendes Vorhaben
- in Produktion

Sachsen:
EU-Schlüsselgebiet für
die Versorgung mit
kritischen Rohstoffen

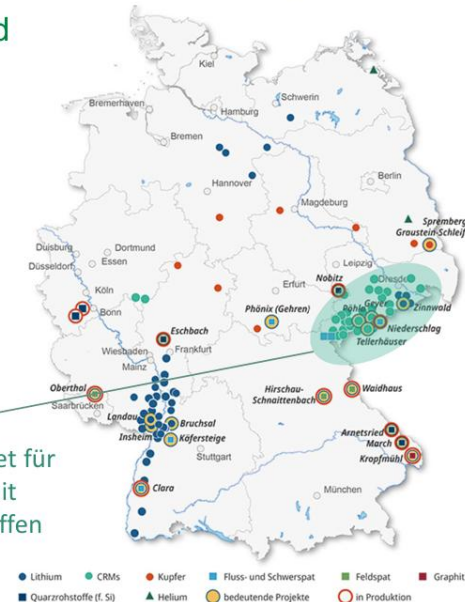


Abb. 5: Kritische mineralische Rohstoffe in Deutschland (vgl. Cramer 2025).

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht des Sächsischen Oberbergamtes zu den Bergbauberechtigungen auf Erze und Spate. Nach Aussagen des Sächsischen Oberberghauptmanns Prof. Cramer sind es 36 laufende Erz-Vorhaben. Dabei ist etwa ein Drittel der Fläche Sachsens mit Berechtsamsfeldern für den Erzbergbau belegt. Das sind seiner Ansicht nach Potentiale, die theoretische Chancen für strategische Projekte und deren Umsetzung mit dem CRMA bieten.

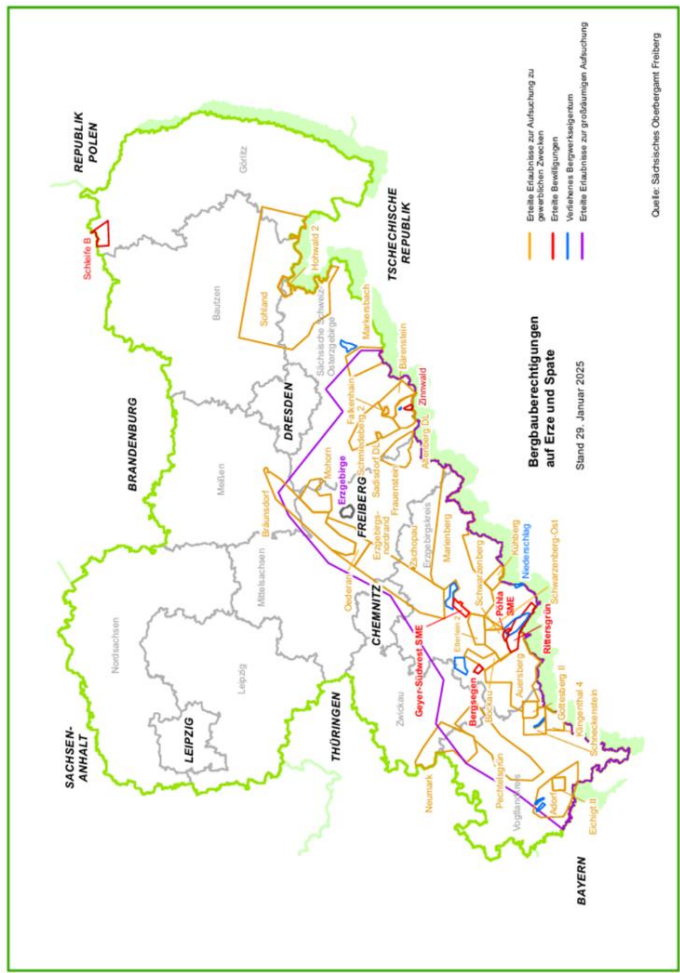


Abb. 6: Bergbauberechtigungen auf Erze und Spate (Quelle: Sächsisches Oberbergamt Freiberg 2025).

2.3 Strategische Projekte

Strategische Projekte leisten einen bedeutenden Beitrag zur Sicherung der Versorgung der EU mit strategischen Rohstoffen. Mit Blick auf die Umweltauswirkungen gelten strategische Projekte in der EU als Projekte von öffentlichem Interesse bzw. als der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit dienende Projekte und können als Projekte von übergeordnetem öffentlichem Interesse betrachtet werden. Sie erhalten in der EU den Status der höchstmöglichen nationalen Bedeutung, sofern ein solcher Status im nationalen Recht vorgesehen ist, und werden in den Genehmigungsverfahren entsprechend behandelt.

Der CRMA soll nicht nur die Dauer von Genehmigungsverfahren verringern, sondern darüber hinaus die Beschaffung finanzieller Mittel aus internationalen Fonds ermöglichen. So können aktuell von Unternehmen Anträge für die Einstufung als „Strategisches Projekt“ bei der Europäischen Kommission gestellt werden.

Um eine einheitliche Bewertung der Potenziale von Rohstoffvorkommen zu ermöglichen, soll auf EU-Ebene verstärkt das Klassifikationschema United Nations Framework Classification for Resources (UNFC) eingesetzt werden (vgl. UNECE 2021).

Die VBGU-Projekte Zinnwald Lithium und Kupferschiefer Lausitz haben sich als strategisches Projekt beworben.

Anmerkung: Bei strategischen Projekten der Rohstoffgewinnung darf das Genehmigungsverfahren nicht länger als 27 Monate dauern. Davon ausgenommen ist die UVP. In Ausnahmefällen darf es sich um höchstens sechs Monate verlängern. Darin liegt eine gewisse Problematik – aus unserer Sicht ist nicht in jedem Fall die personelle Ausstattung der Behörden mit Fachkräften gegeben. Wichtig aus Behördensicht: die Unterlagen zur Beurteilung müssen genehmigungsfähig sein.

2.4 Umsetzung

Mit dem 2.10.2024 startete der Rohstofffonds der Bundesregierung. Mit dem Rohstofffonds will die Bundesregierung die Rohstoffsicherheit, d.h. die Resilienz der deutschen und europäischen Wirtschaft stärken (vgl. Rohstofffonds 2024). Der Rohstofffond wird Projekte zur Gewinnung, Verarbeitung und zum Recycling kritischer Rohstoffe auch mit Eigenkapital unterstützen. Er fokussiert dabei ausschließlich auf kritische oder strategische Rohstoffe im Sinne des CRMA.

Das sächsische Oberbergamt hat eine zentrale Anlaufstelle gem. CRMA-Artikel 9 eingerichtet. Eine Anerkennung der strategischen Projekte durch die EU-Kommission erfolgte im Frühjahr 2025.

Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) hat nach Diskussion mit den Verbänden ein Forderungspapier zur BT-Wahl 2025 unter dem Titel: „Strategisch souverän werden“ formuliert. Damit soll der neuen Bundesregierung die Wichtigkeit der Umsetzung der einheimischen Bergbau-Rohstoffprojekte bewusst gemacht werden (vgl. BDI Forderungen 2025).

Was bedeutet das für die Anträge der VBGU-Unternehmen? Derzeit sieht die Förderbank der KfW, als zuständige Bearbeiterin, Probleme bei der Bestätigung der Anträge der beiden VBGU-Mitglieder KSL und Zinnwald Lithium. Beim Projekt Kupferschiefer Lausitz ist die Antwort der KfW derzeit ablehnend. Die Antwort zum Bergbauprojekt Lithiumgewinnung in Zinnwald steht noch aus (Stand zur Zeit des Vortrages). Hier ist man noch im Gespräch.

2.5 Hemmnisse

Bislang war die bergbauliche Rohstoffgewinnung nicht von der Industrie-Emissions-Richtlinie (IED) erfasst. Aus der Änderung erwächst ein Hemmnis für die Umsetzung des CRMA, denn es erfolgt eine Erweiterung auf Anlagen der mineralgewinnenden Industrie (Erweiterung Anhang I der IED auf Anlagen der mineralgewinnenden Industrie, vgl. Europäische Union 2024):

Gewinnung, einschließlich Aufbereitung vor Ort (Tätigkeiten wie Zerkleinerung, Größenkontrolle, Veredelung und Aufwertung) der folgenden Erze im industriellen Maßstab: Bauxit, Blei, Chrom, Eisen, Gold, Kobalt, Kupfer, Lithium, Mangan, Nickel, Palladium, Platin, Wolfram, Zink und Zinn. Strategische Rohstoffe nach CRMA sind dabei Bauxit, Kobalt, Mangan, Nickel, Wolfram, Kupfer und Lithium. Die letzten Beiden sind, wie beschrieben, auch Gegenstand von Bergbauprojekten von VBGU-Mitgliedern. Zinn ist ebenfalls ein Bergbauprojekt eines VBGU-Mitgliedes und von der IED betroffen, aber kein strategischer Rohstoff in der EU.

Die Umsetzung der Industrie-Emissions-Richtlinie (IED) in nationales Recht für erstmals in den Geltungsbereich der IED aufgenommene bergrechtliche Tätigkeiten benötigt ein grundsätzliches Konzept zur Im-

plementierung in das bestehende Zulassungssystem des Bergrechts. Gewisse Tendenzen der Rücknahme bei den Richtlinien und Verordnungen sind mit dem Industrial Green Deal angedeutet.

Als weitere Hemmnisse in Bezug auf die Dauer der Genehmigungsverfahren erweisen sich die Verfahrensanforderungen:

- Öffentlichkeitsbeteiligung
- Transparenzpflichten
- Umweltmanagementsystem, Transformationsplan etc.
- BREV-Kriterien „Beste verfügbare Technik BVT“ (effizientester und fortschrittlichster Entwicklungsstand).

Dazu kommen die bereits angesprochenen Probleme der personellen Ausstattung der Behörden mit Fachkräften.

Eine Studie vom März 2023 von IW Consult und Fraunhofer für die KfW-Bankengruppe (Kritisch für die Wertschöpfung – Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft. Studie für die KfW Bankengruppe 01.03.2024) kommt zu folgenden Aussagen – wovon hier nur Auszüge angeführt werden (vgl. IW Consult und Fraunhofer ISI 2024, Seite 91):

„Grundlegend lässt sich als eine staatliche Aufgabe festhalten, dass die Wirkung bestehender und geplanter Gesetze verstärkt auf ihre möglichen Hemmnisse in Bezug auf die Rohstoffversorgung überprüft werden sollten (Godart et al. 2023)“. Es wird in der Studie besonders darauf hingewiesen, dass neben dem Aspekt der Primärrohstoffversorgung auch die frühen Verarbeitungsstufen in den Blick genommen werden sollten bzw. die kritischen Versorgungssituationen in der gesamten Wertschöpfungskette zu betrachten sind. Dem kann nur zugestimmt werden. Die Rechtssicherheit der Regelungen ist dabei in Bezug auf die Investitionstätigkeit eine Grundvoraussetzung.

Weiter wird in der Studie auf Seite 91 ausgeführt:

„Rohstoffe in Europa zu erkunden und abzubauen und so die inländische Rohstoffförderung zu erhöhen, kann daher einen Beitrag zur Verbesserung der Rohstoffversorgung (EY/BMWK 2022, Godart et al. 2023) in Deutschland und Europa spielen“. Die Autoren sehen für Lithium, die Seltenen Erden und Kupfer Bemühungen, eine inländische oder innereuropäische Rohstoffförderung zu entwickeln und teilweise auszubauen. Dabei werden

- die Pläne für eine Lithiumförderung aus Tiefenwasser im Oberrheingraben,
- die Pläne zum Abbau von Lithiumvorkommen im Erzgebirge

und

- die Exploration von Kupfervorkommen in der Lausitz angeführt. Betont wird der Aufbau entsprechender Weiterverarbeitungsstrukturen als zentrale Voraussetzung einer industriellen Nutzung dieser Rohstoffvorkommen in Europa. Der Ausbau der inländischen Rohstoffförderung ist kapitalintensiv. Es bestehen außerdem finanzielle Risiken, da zumindest zu Beginn der Projekte fraglich ist, ob sie Rohstoffe zu Weltmarktpreisen in bestehende Marktstrukturen liefern können. Es wird in der Studie empfohlen, dass dort, wo es an Risikokapital für privatwirtschaftliche Investitionen fehlt, staatlicherseits finanzielle Unterstützung geleistet werden könnte. Zitat Seite 92: „Es gibt zudem Argumente dafür, eine eigene staatliche Rohstoffgesellschaft mit dieser Aufgabe zu betrauen, in der auch die fachliche Expertise für die Rohstoffförderung vertreten ist (EY/BMWK 2022)“. Und weiter heißt es: „Um die inländische Rohstoffförderung zu erhöhen, muss daher die lokale und allgemeine Akzeptanz für solche Projekte erhöht werden. Gleichzeitig sollten auch hier bestehende und geplante Gesetze auf Hemmnisse (Godart et al. 2023) für das Ziel einer Sicherung der Rohstoffversorgung überprüft und Zielkonflikte zwischen der Rohstoffsicherung und anderen gesellschaftlichen Zielen transparent gemacht werden.“ Bei allen guten Ansätzen einer gesicherten Rohstoffversorgung in Europa, wie auch in Deutschland, scheint mir das, eine der größten Hürden und gleichzeitig wichtigsten Aufgaben zu sein.

3 Fazit

Die Umsetzung des Critical Raw Materials Act ist eine Chance für Deutschland und Europa, stabile Lieferketten zu etablieren und sich etwas unabhängiger von China im Rohstoffbereich zu machen. Dazu müssen die angesprochenen Hemmnisse beseitigt werden. Die einheimische Rohstoffförderung sichert nicht nur Arbeitsplätze in Deutschland, sondern ist klimaschonender aufgrund kurzer Liefer- und Transportwege. Das klappt aber nur, wenn auch Rohstoffe in Europa aufbereitet und verhüttet werden. Neben dem Rohstofffonds sollte aber auch über einen Explorationsfonds in Deutschland nachgedacht werden.

Die Mitgliedsunternehmen im VBGU besitzen Expertise in allen Bereichen des Lebenszyklus eines Bergwerkes, von der Erkundung bis zur Rekultivierung/Sanierung und im Altbergbau.

Die Bedeutung von Innovationen im Bergbau wird in Zukunft weiter zunehmen. Der VBGU versucht die Wichtigkeit der Rohstoffgewinnung und des Bergbaus in Deutschland, insbesondere bei der jungen Generation, weiter zu vermitteln – z.B. durch Mitarbeit im Verein RohstoffWissen e.V., einer von Verbänden gegründeten Initiative zur Förderung der Rohstoffkultur.

Eine Schlüsselposition kommt der Politik zu, deshalb pflegt der VBGU-Kontakte zur Bundes- und Landespolitik – sie muss sich allerdings zur Rohstoffgewinnung öffentlich bekennen.

4 Bibliographie

BDI Forderungen zur BT-Wahl (2025): „Strategisch souverän werden“ <https://bdi.eu/publikation/news/btw25-strategisch-souveraen-werden>; abgerufen am 11.02.2025.

BMWK (2022): Staatliche Instrumente zur Erhöhung der Versorgungssicherheit von mineralischen Rostoffen – Endbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Ernst & Young GmbH & Co. KG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/studie-staatliche-instrumente-versorgungssicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Cramer, Bernhard (2025): Bergbau in Sachsen – neue Herausforderungen in unruhigen Zeiten. Vortrag VBGU-Neujahrsempfang, Berlin, 31.01.2025.

CRMA (2024): Critical Raw Materials Act – Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA relevance) <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>.

Europäische Union (2023): Europäische Verordnung zu kritischen Rohstoffen, März 2023. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/874771/Factsheet_GD_European%20Critical%20Raw%20Materials%20Act_DE.pdf.pdf.

Europäische Union (2024): Richtlinie (EU) 2024/1785 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 zur Änderung der

- Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen und der Richtlinie 1999/31/EG des Rates über Abfalldeponien.
- EU-Richtlinie (2024): Richtlinie 2024/1785 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 zur Änderung der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) und der Richtlinie 1999/31/EG des Rates über Abfalldeponien.
- Godart, Olivier / Abel, Patrick / Bode, Eckardt / Heimann, Tobias / Herrmann, Christoph / Kamin, Katrin / Peterson, Sonja / Sandkamp, Alexander (2023): Resilienz der Langfriststrategie Deutschlands zum Klimaschutz. Kiel Institut für Weltwirtschaft, Kiel. <https://handle.net/10419/317055>.
- IW Consult und Fraunhofer ISI (2024): Studie für die KfW-Bankengruppe (Kritisch für die Wertschöpfung – Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft Studie für die KfW Bankengruppe 01.03.2024) <https://www.kfw.de/%C3%9Cber-die-KfW/Service/Download-Center/Konzernthemen/Research/Studien-und-Materialien/?redirect=78473>.
- Lobbyregister beim Deutschen Bundestag (2025): <https://www.lobbyregister.bundestag.de/> Letzter Aufruf 18.08.2025.
- Rohstofffonds der Bundesregierung (2024): Pressemitteilung - Rohstoffe und Ressourcen. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/10/20241002-rohstofffonds-der-bundesregierung-startet.html>; abgerufen am 02.10.2024
- Sächsisches Oberbergamt Freiberg (2025): Bergbauberechtigungen auf Erze und Spate, 29.01.2025, Erze und Spate – Sächsisches Oberbergamt – Sachsen.de.
- UNECE (2021): United Nations Economic Commission for Europe: Klassifikationsschema United Nations Framework Classification for Resources (UNFC).

Ausgewählte rohstoffgeologische Aspekte der Umsetzung des Critical Raw Materials Act (CRMA) in Sachsen

Uwe Lehmann
(LfULG, Freiberg)

Abstract

The global demand for raw materials has risen sharply, particularly in the past two decades, and has led to temporary shortages of numerous raw materials. In order to counter this shortage, which is also noticeable in Europe, the EU began in 2011 to define critical and, more recently, strategic raw materials and to (re)establish a secure supply of raw materials, particularly these selected raw materials, by means of the Critical Raw Materials Act (CRMA). Both the selection and designation of the raw materials classified as priorities and the approach to implementing the CRMA raise a number of questions from a raw materials geology perspective, which are presented in more detail using Saxony as an example. In order to utilize the known raw material potential, i.e. to consistently solve the numerous challenges that arise, ultimately to extract the domestic raw materials by mining, and thus remedy the shortage mentioned, it is essential to provide the necessary resources (financial and human).

Resümee

Der weltweite Rohstoffbedarf ist besonders in den vergangenen beiden Dekaden stark gestiegen und hat bei zahlreichen Rohstoffen zu zeitweisen Engpässen geführt. Um diesem auch in Europa spürbaren Mangel zu begegnen, hat die EU 2011 begonnen, kritische und zuletzt auch strategische Rohstoffe zu definieren und mittels des 2024 verabschiedeten

Critical Raw Materials Act (CRMA) eine gesicherte Rohstoffversorgung insbesondere mit diesen ausgewählten Rohstoffen (wieder) herzustellen. Sowohl die Auswahl und Benennung der als vorrangig eingestuften Rohstoffe, als auch die Herangehensweise an die Umsetzung des CRMA werfen aus rohstoffgeologischer Sicht einige Fragen auf, die am Beispiel Sachsens näher dargestellt werden. Um das bekannte Rohstoffpotenzial in Wert zu setzen, also konsequent die sich ergebenden zahlreichen Herausforderungen zu lösen, letztlich die heimischen Rohstoffe bergbaulich zu gewinnen und damit dem angesprochenen Mangel abzuhelpfen, ist eine Bereitstellung der dazu erforderlichen Ressourcen (finanziell und personell) unabdingbar.

Keywords/Schlüsselwörter

Critical and strategic raw materials, Critical Raw Materials Act, occurrences, Saxony;

Kritische und strategische Rohstoffe, Critical Raw Materials Act, Vorkommen, Sachsen.

1 Einführung

Der Wunsch der meisten Menschen, in materiellem Wohlstand zu leben, hat vor allem in den letzten Dekaden zu einer starken Zunahme der Produktion materieller Güter geführt. Inwieweit dies durch die Rahmenbedingungen des global vorherrschenden kapitalistischen Systems getriggert wird oder ein primäres, den Menschen inhärentes Bedürfnis ist, und ob dies tatsächlich zu einem insgesamt zufriedeneren Leben führt, soll hier nicht diskutiert werden.

Seit etwa 2005 ist die weltweite Nachfrage nach bergbaulich gewonnenen Rohstoffen in bisher unerreichter Größenordnung stark gestiegen und konnte aus verschiedenen Gründen in vielen Fällen nicht ausreichend gedeckt werden. Das damit einhergehende gestiegene Risiko von Versorgungsengpässen führte unter anderem in Europa dazu, dass 2011 erstmals eine Liste von 14 sogenannten „kritischen“ Rohstoffen in der EU erstellt wurde (KOM, 2011). Nachfolgend wurde diese Liste alle drei Jahre korrigiert und zuletzt 2024 auf 34 kritische Rohstoffe sowie um 17 sogenannte „strategische“ Rohstoffe erweitert.

Das insbesondere mit dem Critical Raw Materials Act (vgl. CRMA 2024) seitens der EU gesetzte Ziel, die Versorgungssicherheit Europas im Hinblick auf kritische und strategische Rohstoffe deutlich zu stärken

– unter anderem durch verstärkte bergbauliche Gewinnung – führt zu der Frage, inwieweit das innerhalb Deutschlands vergleichsweise rohstoffreiche Sachsen einen entsprechenden Beitrag leisten könnte. Dieses Themenfeld wird nachfolgend für einige Aspekte näher betrachtet.

2 Klärung ausgewählter Begriffe des CRMA

Bei der Einführung des Begriffs „kritische Rohstoffe“ hat die EU ihre dafür entwickelte Definition („... deshalb kritisch, weil bei ihnen das Risiko eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft größer sind als bei den meisten anderen Rohstoffen ...“) als transparent, innovativ und pragmatisch methodisch bezeichnet (vgl. KOM 2011). Diese verbale Kennzeichnung ermöglicht einen großen Interpretationsspielraum.

Die nunmehr in Anhang II, Abschnitt 2 des CRMA 2024 vorgenommene, sich über mehrere Seiten erstreckende, zahlreiche Formeln benutzende und damit transparente Wissenschaftlichkeit suggerierende Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos als Grundlage der Auswahl kritischer Rohstoffe verwendet knapp 30 Parameter. Bei näherer Betrachtung dieser zahlreichen ökonomischen Kennziffern stellt sich allerdings die Frage, wie gesichert die dafür verwendete Datenbasis im jeweiligen Einzelfall tatsächlich ist. Im Vergleich dazu erscheint die in Anhang I Abschnitt 2 vorgestellte Methodik zur Auswahl strategischer Rohstoffe zwar deutlich kürzer, aber auch dort bleibt für Außenstehende offen, wie zum Beispiel die „Schwierigkeit, die Produktion zu steigern“ oder „die Menge der strategischen Technologien, die einen Rohstoff als Input verwenden“ sinnvoll und insbesondere eindeutig in Zahlen gefasst und für eine Berechnung verwendet werden können.

Eine Zusammenstellung der zwischen 2011 und 2024 von der EU erstellten Listen kritischer und strategischer Rohstoffe (Abbildung 1) ermöglicht einerseits ein teilweise vertieftes Verständnis, welche konkreten Rohstoffe eigentlich mit dem CRMA adressiert werden. Andererseits ergeben sich daraus auch neue Fragestellungen und Hinweise für eine zukünftig eindeutige Darstellung. Konkrete Beispiele werden nachfolgend in zeitlicher Reihenfolge angesprochen.

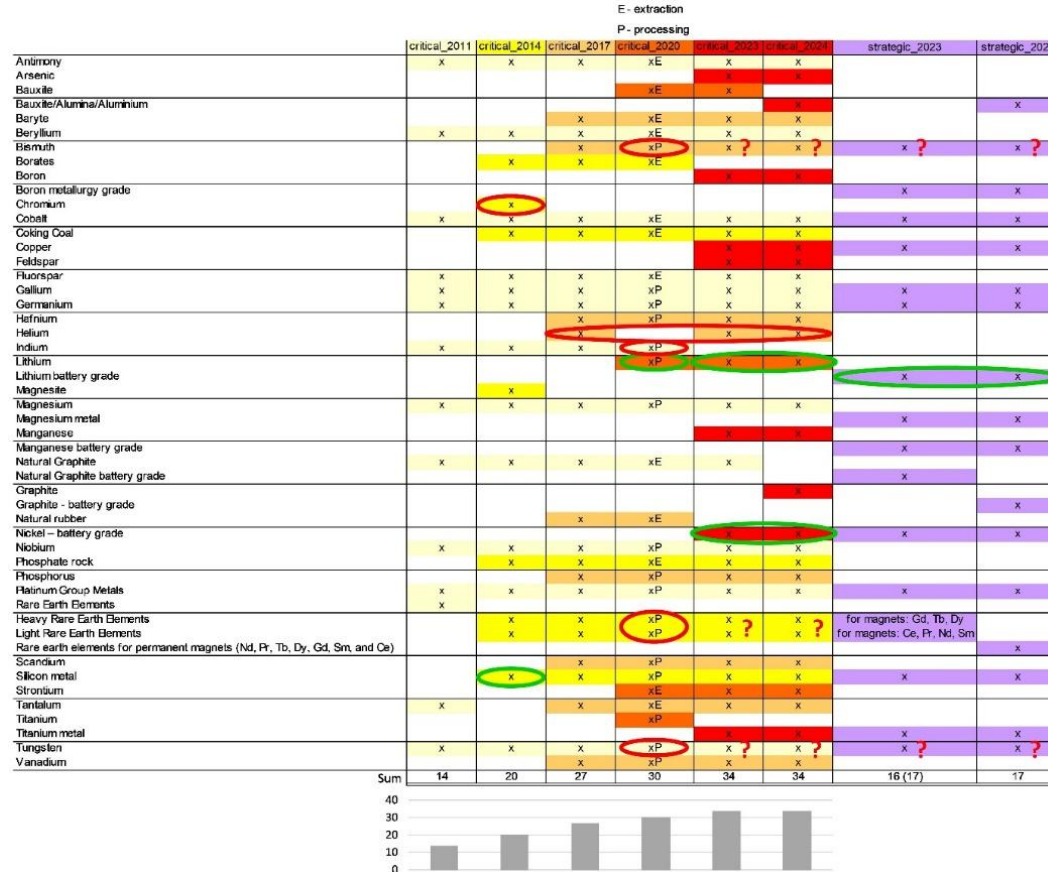


Abb. 1: Entwicklung von Art und Anzahl kritischer und strategischer Rohstoffe im Zeitraum 2011 – 2024; je nach Jahr der erstmaligen Erwähnung sind die Rohstoffe mit unterschiedlichen Farben hinterlegt; grüne und rote Ellipsen sowie Fragezeichen kennzeichnen ausgewählte lobenswerte (grün) und fragwürdige (rot) Sachverhalte – siehe dazu die jeweiligen Erwähnungen im Text:

Während im Jahr 2011 mit Ausnahme von Fluorspar alle als kritisch betrachteten Rohstoffe in elementarer Form aufgelistet wurden, wird mit „Silicon metal“ in der Liste von 2014 erstmals klargestellt, dass die Kritikalität einiger Rohstoffe nicht etwa auf einer eingeschränkten Verfügbarkeit ihrer natürlichen Lagerstätten beruht. Silizium mit einem Clarke-Wert von größenordnungsmäßig etwa 25% (je nach Berechnungsmethode) gehört in Form des Minerals Quarz sowie in diversen natürlichen Silikaten gebunden zu den häufigsten chemischen Elementen und ist auf allen Kontinenten in praktisch unerschöpflichen Mengen vorhanden. Wirtschaftlich von besonderer Bedeutung ist allerdings das nach einem energieaufwändigen Prozess hergestellte Silizium-Metall. Die Formulierung in der 2014-er Liste lässt diesbezüglich keinen Zweifel aufkommen. Um dem Mangel Europas abzuhelpfen, ist demgemäß nicht die Suche nach neuen Silizium-Lagerstätten erforderlich, sondern beispielsweise die Errichtung neuer Kapazitäten zur Erzeugung von Rohsilizium.

In der Liste aus dem gleichen Jahr wird Chromium eingeführt, welches in den nachfolgenden Jahren dann allerdings nicht wieder auftaucht. Hier stellt sich die Frage, inwieweit die Auswahl kritischer und strategischer Rohstoffe in den EU-Listen den tatsächlichen Anforderungen der Marktwirtschaft entspricht. Zeitlich nachfolgend noch deutlicher wird diese Fragestellung in der Liste des Jahres 2017, in der Helium für drei Jahre als kritisch eingestuft wird, dann in 2020 diesen Status wieder verliert, um schließlich 2023 und 2024 erneut als kritisch eingestuft zu werden. Eine derartige Variabilität der Beurteilung einschließlich der sich damit ändernden Rahmenbedingungen kann für ein wirtschaftlich agierendes Unternehmen schwerlich eine belastbare Grundlage für langzeitliche und finanziell aufwändige Investitionsentscheidungen beispielsweise zur Beschaffung von Helium darstellen.

Ähnlich ist die Handhabung von Indium einzuschätzen, welches von 2011 bis 2020 als unentbehrlicher Rohstoff zunächst gehypt wurde und derzeit (seit 2023) aus der Liste kritischer und strategischer Rohstoffe wieder entfernt ist. Die Bedeutung solcher für die Wirtschaft unentbehrlichen Elektronikmetalle allein anhand kurzfristiger Sachlagen zu entscheiden, negiert den finanziellen und zeitlichen Aufwand zur Installation von entsprechenden Bergbau- und Verarbeitungskapazitäten.

Positiv an der Liste des Jahres 2020 ist hervorzuheben, dass in ihr für jeden einzelnen Rohstoff (die weiterhin überwiegend in elementarer Form aufgelistet werden) mit dem Attribut „Phase“ gekennzeichnet

wurde, ob es um „Förderung“ oder „Verarbeitung“ geht. So wird am Beispiel des dort aufgeführten Galliums (Phase: Verarbeitung), bei dem Deutschland mit 35% als wichtigstes Lieferland der EU angeführt ist, deutlich, dass auch hier die Kritikalität erst im Verlaufe des Verarbeitungsprozesses entsteht.

Leider ist diese konsequente Klarstellung mittels des genannten Attributs, ob für einen aufgelisteten Rohstoff die Verfügbarkeit von Lagerstätten kritisch ist, oder ob erst in irgendeinem Stadium der Verarbeitung eine kritische Engstelle vorhanden ist, in den Listen der Folgejahre (2023 und 2024) wieder entfernt worden. So bleibt beispielsweise für Bismuth, Heavy Rare Earth Elements, Light Rare Earth Elements und Tungsten für die Zeit nach 2020 offen, ob sich die Kritikalität auch weiterhin auf die Verarbeitung bezieht oder ob die bergbauliche Gewinnung dieser Rohstoffe unzureichend ist.

Nur für Lithium und Titanium wurde auch nachfolgend verdeutlicht, wo die Herausforderungen liegen:

1. Lithium bleibt auch in 2023 und 2024 kritisch, während parallel dazu als neuer (strategischer) Rohstoff „Lithium – Batteriequalität“ indiziert wurde. Für Europa lässt sich daraus also einerseits der Auftrag ableiten, Lithium-Lagerstätten zu suchen und die gewünschten Mengen Lithium bergbaulich zu gewinnen, während andererseits nachgeschaltete Aufbereitungskapazitäten zur Herstellung von Lithium in Batteriequalität einen Engpass darstellen.
2. Den noch 2020 in der Liste verwendeten Begriff „Titanium“ gibt es in 2023 und 2024 nicht mehr; dafür wurde „Titanium metal“ eingeführt und als kritisch bezeichnet. Hier geht es also „nur“ um die Verarbeitung von Titan-Vorprodukten.

Als letztes Diskussionsbeispiel ist bei dem 2023 eingeführten und in 2024 erneut aufgelisteten Rohstoff „Nickel – Batteriequalität“ zu folgern, dass Europa derzeit keine Nickel-Lagerstätten sucht, sondern auch hier die Verarbeitung zu batteriefähigem Nickel adressiert ist.

Die in den zitierten Listen erfassten kritischen und strategischen Rohstoffe werden für zahlreiche Technologien benötigt und es ist davon auszugehen, dass viele einschlägige Wirtschaftsunternehmen entsprechende Engpässe bereits erfahren haben und die konkreten ‚Knackpunkte‘ kennen. Die damit verbundenen Herausforderungen zu lösen, ist jedoch eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe und schon aus diesem Grund sollten

künftige Listen kritischer und strategischer Rohstoffe erheblich klarer und allgemeinverständlicher als bisher benennen, wo jeweils das konkrete Problem liegt und was zu dessen Beseitigung zu tun ist.

3 Vorkommen kritischer und strategischer Rohstoffe in Sachsen

Die meisten der von der EU als kritisch oder strategisch eingestuften Rohstoffe können der Rohstoffgruppe „Erze und Spate“ zugeordnet werden. Eine erste Übersicht der wichtigsten historischen und teilweise auch aktuell relevanten sächsischen Vorkommen wurde 2008 erstellt und öffentlich zugänglich gemacht (vgl. Steckbriefkatalog 2008). Diese Datenbasis wurde vom Staatlichen Geologischen Dienst Sachsens (SGD) nachfolgend sukzessive qualitativ und quantitativ erweitert und präzisiert.

In Abbildung 2 ist die Lage der inzwischen 149 Lokalitäten auf dem Territorium Sachsens dargestellt.

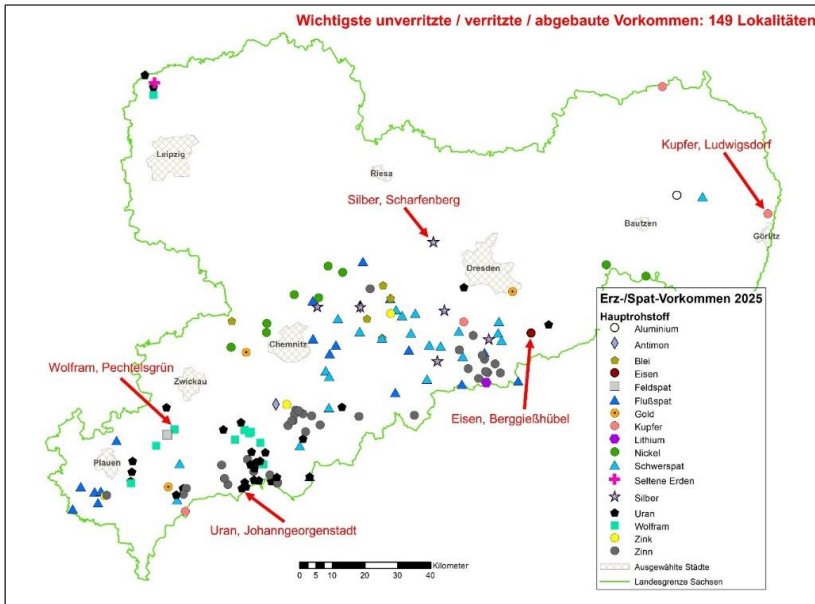


Abb. 2: Lage der bedeutendsten abgebauten, teilverritzten und unverritzten Vorkommen von Erzen und Spaten auf dem Territorium Sachsens; die meisten Lokalitäten befinden sich im Erzgebirge (südlich Chemnitz und Dresden) sowie Vogtland (um Plauen); beispielhaft sind (mit Pfeilen und Namen) einige historisch bedeutsame – heute komplett abgebaute – Erzvorkommen dargestellt; Datenquelle: FISRO (2025).

Viele der in Abbildung 2 gezeigten Vorkommen besitzen aus verschiedenen Gründen (z.B. wegen Vorratserschöpfung) heute keine wirtschaftliche Bedeutung mehr (z.B. Wolfram Pechtelsgrün). Andererseits verfügen etliche Lokalitäten über ein erhebliches Potenzial, zukünftig als Rohstofflieferanten genutzt zu werden (z.B. Lithium Zinnwald). Der Übergang zwischen beiden Extremen ist fließend. Eine überschlägige Abschätzung führt zu etwa 50 Vorkommen, bei denen es kurz- bis langfristig denkbar erscheint, dort eine ökonomisch sinnvolle bergbauliche Gewinnung durchzuführen. Etwa 20 dieser Vorkommen beinhalten als Haupt-Rohstoff kritische oder strategische Rohstoffe (Abbildung 3).

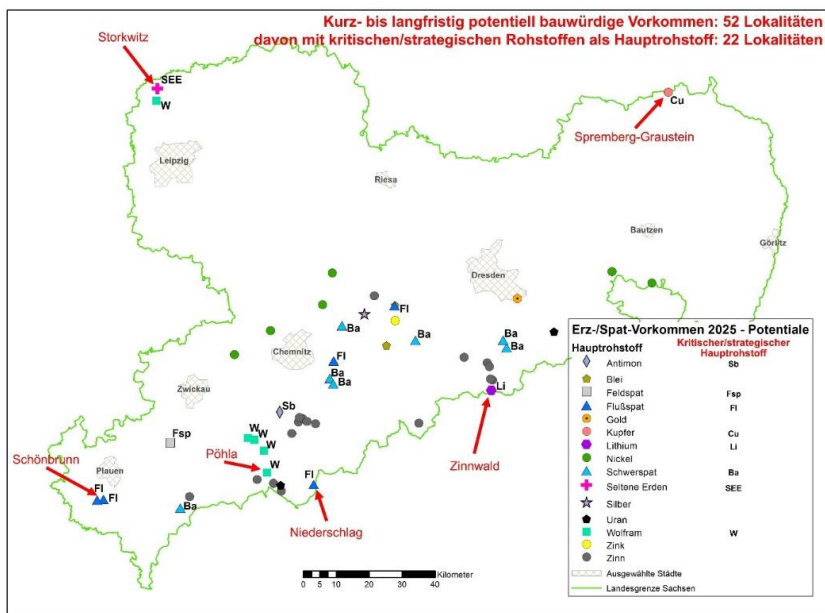


Abb. 3: Teilmenge der in Abbildung 2 dargestellten Vorkommen, welche aus heutiger Sicht kurz- bis langfristig ein wirtschaftlich relevantes Potenzial aufweisen (52 Lokalitäten) beziehungsweise zusätzlich als Hauptrohstoff kritische oder strategische Rohstoffe beinhalten (22 Lokalitäten); beispielhaft sind einige Vorkommen gekennzeichnet, welche in den vergangenen Jahren in den Massenmedien besonders hervorgehoben wurden; derzeit (2025) verfügen nur wenige Vorkommen (5 bis 10 Lokalitäten) über eine kurzfristig nutzbare wirtschaftliche Bedeutung.

Einige der in Abbildung 3 gezeigten Vorkommen würden bei einer zukünftigen bergbaulichen Gewinnung Hauptrohstoffe abbauen, die aus derzeitiger Sicht als unkritisch eingeschätzt werden (z.B. Zinn in Hämmerlein-Tellerhäuser). Allerdings treten dort in einigen Fällen kritische und/oder strategische Rohstoffe als Begleitrohstoffe auf, die bei der Gewinnung der Hauptrohstoffe als Nebenprodukte gewonnen werden könnten. Dadurch erhöht sich die Anzahl der für den CRMA relevanten Vorkommen auf 43 Lokalitäten (Abbildung 4).

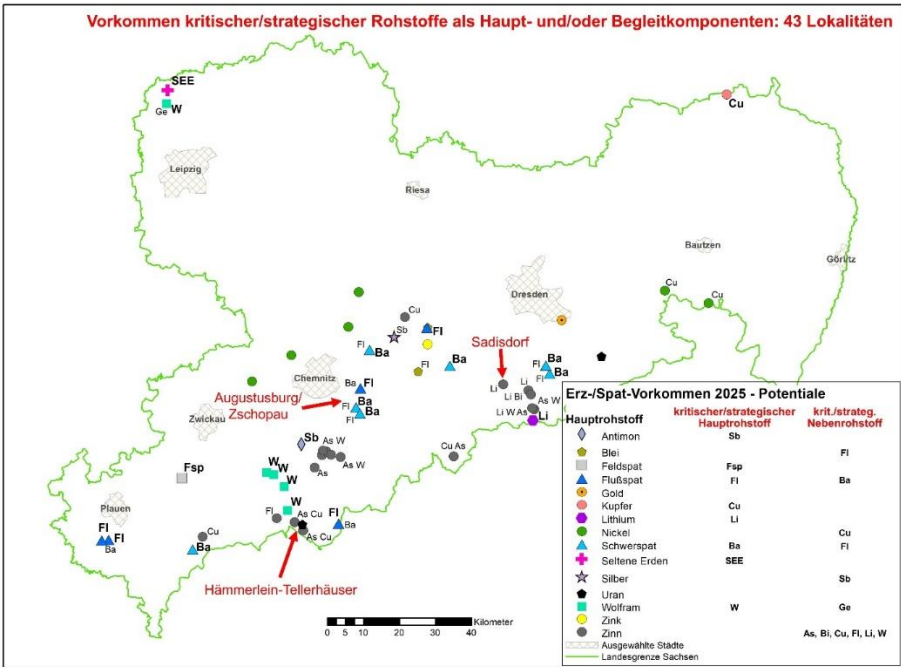


Abb. 4: Teilmenge der in Abbildung 2 dargestellten Vorkommen, welche aus heutiger Sicht kurz- bis langfristig ein wirtschaftlich relevantes Potenzial aufweisen (52 Lokalitäten) beziehungsweise zusätzlich als Haupt- und/oder Nebenrohstoff kritische oder strategische Rohstoffe beinhalten (43 Lokalitäten); beispielhaft sind einige markante Vorkommen gekennzeichnet (siehe auch Erläuterungen im Text); analog zu Abbildung 3 verfügen derzeit (2025) nur wenige Vorkommen (5 bis 10 Lokalitäten) über eine kurzfristig nutzbare wirtschaftliche Bedeutung.

Lithium in Form von Glimmern der Zinnwaldit-Gruppe tritt beispielsweise häufig in relevanten Mengen in den osterzgebirgischen Zinnlagerstätten (z.B. Sadisdorf) auf, während die Zinnvorkommen des Westerzgebirges (z.B. Skarne im Raum Hämmerlein-Tellerhäuser) kein wirtschaftlich relevantes Lithium beinhalten und dort z.B. eher Arsen, Kupfer oder Wolfram als Begleitrohstoffe führen. Bei den zahlreichen Spatgängen im Mittel- und Osterzgebirge kommen häufig Fluss- und Schwerspat gemeinsam in wechselnden Mengenverhältnissen vor, sodass in vielen Fällen beide Rohstoffe gemeinsam gewonnen werden könnten. Stellvertretend für viele weitere Lokalitäten ist in Abbildung 4 das Gebiet Augustburg–Zschopau näher bezeichnet, in dem zu DDR-Zeiten mehrere derartige Gänge mit unterschiedlicher Intensität erkundet wurden.

4 Herausforderungen für eine zukünftige Gewinnung kritischer und strategischer Rohstoffe

Unter den aktuellen Rahmenbedingungen ist davon auszugehen, dass sich die bergbauliche Gewinnung der mit dem CRMA adressierten kritischen und strategischen Rohstoffe finanziell selbst tragen muss. Eine direkte finanzielle staatliche oder vergleichbare Förderung eines nicht „von selbst“ rentablen Bergbaus erscheint derzeit unwahrscheinlich.

Allerdings können bei entsprechendem politischem Willen zahlreiche Randbedingungen positiv beeinflusst werden, wie das der CRMA beispielsweise bezüglich der Dauer von Genehmigungsverfahren für strategische Rohstoffprojekte vorsieht. Für das in Sachsen relativ reichlich vorhandene Lithium könnten solche „weichen“ Randbedingungen eine hohe Relevanz besitzen. Für Vorkommen, in denen kritische und/oder strategische Rohstoffe nur als Begleitkomponenten auftreten (z.B. Lithium oder Kupfer in den zahlreichen und bedeutsamen Zinnvorkommen), erscheint eine solche Möglichkeit derzeit allerdings (noch) nicht gegeben.

Als kritisch im Hinblick auf die wirtschaftliche Rentabilität zukünftiger Bergbauprojekte sind unter anderem vergleichsweise geringe Wertstoffgehalte (z.B. SEE Storkwitz: $\approx 0,5\%$ SEE-Oxide, davon Ce + La ca. 75%), große Teufen (z.B. Kupferschiefer Lausitz ≈ 1.000 m), kompliziert aufgebaute Lagerstättenkörper (z.B. schlauchförmige Greisenkörper im Zinnvorkommen Gottesberg) und teils schwierige Aufbereitbarkeit (z.B.

Skarne im Westerzgebirge: relativ geringe Korngrößen der Wertkomponenten, Verwachsungen mit störenden Fremdmineralen) zu bewerten. Auch diesbezüglich könnte seitens der Politik noch deutlich mehr unternommen werden, insbesondere durch entsprechende Forschungsförderungen, in deren Verlauf z.B. die Gewinnung und Aufbereitung der einheimischen Rohstoffe effizienter gestaltet werden könnte.

In den vergangenen Jahren sind weitere bergbau-hemmende Faktoren hinzugekommen oder haben sich verschärft, die es früher in diesem Umfang nicht gab. Dazu gehören beispielsweise immer schwerer zu berücksichtigende gesetzliche Auflagen, Berichtspflichten, gestiegene Energiepreise, Fachkräftemangel, Akzeptanzprobleme und noch viele weitere Herausforderungen, welche die Kosten und Dauer der erforderlichen Genehmigungsverfahren stetig in die Höhe treiben.

Hier besteht eine deutliche Diskrepanz einerseits zwischen der seitens Politik und Medien betonten besonderen Bedeutung einer gesicherten Rohstoffversorgung sowie andererseits der eher zunehmend schwieriger werdenden Realisierung zukünftiger Bergbauvorhaben, um diesem Mangel abzuhelpfen. Selbst vergleichbar einfach vorzunehmende Verbesserungen, wie eine vertiefte Rohstoffsicherung im Rahmen der Raumordnung – konkret durch eine deutlich verstärkte, insbesondere langfristig orientierte Ausweisung von Vorranggebieten für den Rohstoffabbau im Rahmen der Landes- und Regionalplanung – werden nicht ernsthaft verfolgt, obwohl die bestehenden Defizite seit vielen Jahren bekannt sind. Bei der im Rahmen von Bergbaugenehmigungsverfahren vorzunehmenden Abwägung wird im Regelfall zahlreichen anderen, dem Bergbau entgegenstehenden Belangen ein höheres Gewicht zugeordnet. Dies erfolgt durchaus gesetzeskonform, da in den vergangenen Jahren sich einerseits viele bergbaufremde Regelungen verschärft haben (z.B. die mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz verbundenen Anforderungen, vgl. EEG 2025), während andererseits trotz der gewachsenen Bedeutung einheimischen Bergbaus, dieser aus gesetzgeberischer Sicht kaum eine höhere Gewichtung erfahren hat.

So bleibt vorerst offen, wie deutlich das in Form diverser Rohstoffstrategien und unter anderem mittels des CRMA formulierte Lippenbekenntnis der Politik zu mehr einheimischem Bergbau tatsächlich durch praktische Erfolge zeigende Maßnahmen unterstützt wird. Ohne zusätzliches Personal in den entsprechenden Behörden können beispiels-

weise die seitens CRMA geforderten verkürzten Genehmigungsverfahren nicht wirklich realisiert werden. Und auch die durch den CRMA geforderten Nationalen Explorationsprogramme benötigen – wenn sie wirklich zum Auffinden neuer Lagerstätten führen sollen – zusätzliche finanzielle und personelle Mittel, die bisher in relevanter Größenordnung in Deutschland nicht bereitgestellt werden.

Erst nach Bewältigung dieser skizzierten Herausforderungen werden die in den Abbildungen 3 und 4 dargestellten Lokalitäten für eine tatsächliche Rohstoffversorgung relevant.

5 Potenziale sächsischer Erz- und Spatvorkommen aus übergeordneter Sicht

Trotz der umfangreichen Explorationsaktivitäten, die durch in- und ausländische Unternehmen auf dem Territorium Sachsens durchgeführt wurden (Abbildung 5), seit etwa 2005 die Rohstoffpreise global in die Höhe stiegen, scheint detailliertes Wissen um die Potenziale sächsischer Erz- und Spat-Vorkommen außerhalb Sachsens nur teilweise bekannt zu sein.

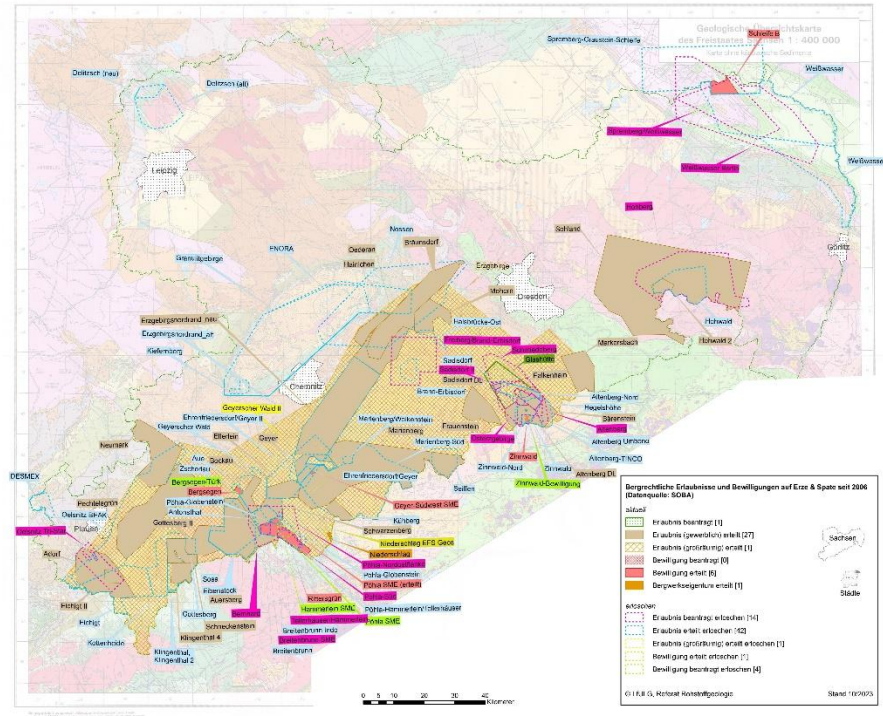


Abb. 5: Seit 2006 beim Sächsischen Oberbergamt eingegangene Anträge (2023: knapp 100 Stück) auf Erteilung von

So war beispielsweise in einer im Januar 2024 im Rahmen des GSEU-Projektes (vgl. GSEU 2022) erstellten europaweiten Karte (vgl. MAP 2024) Sachsen lediglich mit dem Rohstoff Arsen und dies zudem im bergbaulich zumindest kurzfristig wenig aussichtsreichen Freiburger Revier vertreten. Aus rohstoffgeologischer Sicht erscheint diese Darstellung fachlich unhaltbar. Mittlerweile ist diese Karte im Internet nicht mehr auffindbar. Dafür existiert eine neuere Version (vgl. MAP 2025), in welcher nunmehr einige der in Abbildung 4 präsentierten Vorkommen korrekt, andere dagegen unrealistisch dargestellt werden (Abbildung 6). Positiv ist die ergänzend zur Karte abrufbare Datenbank der einzelnen Lokalitäten zu bewerten, die allerdings im Detail an einigen Stellen erhebliche fachliche Mängel aufweist. Unter anderem werden für einige Lokalitäten und Rohstoffe aus heutiger wirtschaftlicher Sicht unrealistische Vorratsangaben zugrunde gelegt. Dies trifft beispielsweise für die dort aufgeführte Lokalität „Enora“ zu, bei der vordergründig geringgradig nickelvererzte zahlreiche kleine Serpentin-Körper von Interesse sind, die im Bereich des Sächsischen Granulitgebirges auftreten, dort über eine Fläche von etwa 800 km² verteilt sind und untergeordnet auch etwa Kobalt führen. Abgesehen von der in Kapitel 2 angesprochenen Frage, ob Nickel derzeit tatsächlich als kritischer Rohstoff anzusehen ist, bleibt offen, inwieweit die in der oben erwähnten Datenbank angeführten Nickel-Mengen (294.500 Tonnen) realistisch gewinnbar sind. Bezugnehmend auf die weitaus geringeren möglichen Tonnagen an Kobalt als Begleitrohstoff (angeführt werden 14.422 Tonnen), fehlt in der Datenbank der wichtige Hinweis, ob es sich bei den jeweiligen Rohstoffen um die Haupt- oder Begleitkomponenten handelt. Im hier angeführten Beispiel könnte Kobalt erst tatsächlich gewonnen werden, wenn sich der Bergbau hinsichtlich des Hauptrohstoffs – Nickel – rentabel gestalten würde.

Gleiches gilt beispielhaft auch für den Rohstoff Gallium, welcher für die Lokalität Geyer in Karte und Datenbank angeführt wird. Die Eröffnung eines alleinigen „Gallium-Bergwerks“ erscheint unrealistisch. Erst wenn der dort vorhandene Hauptrohstoff – Zinn (weder in Karte, noch in Datenbank aufgeführt) – wirtschaftlich sinnvoll gewinnbar ist, könnte die Begleitkomponente Gallium gewonnen werden. Ob die dafür erforderlichen zusätzlichen Verfahrensschritte tatsächlich wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar wären, müssten ergänzende Machbarkeitsuntersuchungen erst noch nachweisen.

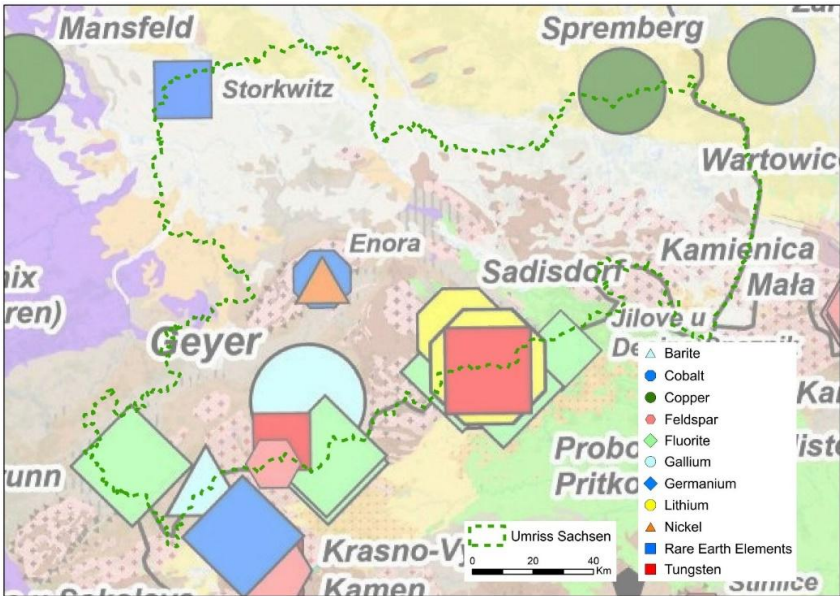


Abb. 6: Sachsen; umfassender Ausschnitt aus einer aktuellen Karte (vgl. MAP 2025) der Vorkommen kritischer Rohstoffe in Europa.

Grundsätzlich ist eine möglichst umfassende Darstellung von Rohstoffpotenzialen in einem ersten Schritt sinnvoll, um aufzuzeigen, welche Rohstoffe zukünftig für eine bergbauliche Gewinnung überhaupt in Frage kommen. Dabei sollten einerseits alle bekannten Potenziale zunächst gleichrangig dargestellt werden und dann in einem folgenden Schritt – möglichst frühzeitig – die unterschiedlichen tatsächlichen Realisierungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, um eine den wirtschaftlichen Realitäten entsprechende Priorisierung vornehmen zu können. Diesen Ansprüchen wird die in Abbildung 6 gezeigte Karte des GSEU-Projektes nur teilweise gerecht. Hier wurde aus dem Rohstoffpotenzial (Abbildung 4) bereits eine Auswahl getroffen, die z.B. für die Lokalitäten Brunndöbra (Baryt) und Storkwitz (SEE) in naher und mittlerer Perspektive schon aus dem Grund wenig aussichtsreich erscheint, als dort nach 1990 ein unmittelbares wirtschaftliches Interesse seitens Explorationsfirmen noch nie bestand (Brunndöbra) bzw. nicht mehr (Storkwitz) existiert. Demgegenüber ist bei anderen – nicht in der Karte angeführten – Vorkommen seit einigen Jahren eine rege Tätigkeit im Rahmen erteilter

bergrechtlicher Erlaubnisansträge zu verzeichnen (z.B. Nickel-Erkundung in der Lausitz).

Eine den eben genannten Ansprüchen besser gerecht werdende Darstellung wurde durch Henning et al. (2024) vorgenommen. Die jener Publikation entnommene und ergänzte Abbildung 7 umfasst einen Großteil der aus Sicht des Staatlichen Geologischen Dienstes von Sachsen kurz- bis langfristig relevanten Vorkommen kritischer Rohstoffe und verdeutlicht unter anderem mit der Kennzeichnung „bedeutende Projekte“ die derzeit wirtschaftlich aussichtsreichsten Bergbauprojekte.

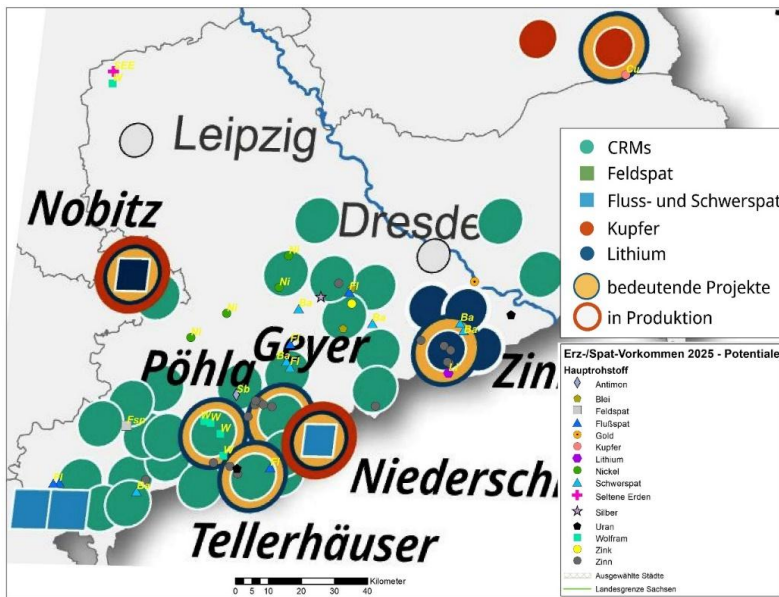


Abb. 7: Sachsen; umfassender Ausschnitt aus einer aktuellen Karte (vgl. Henning et al. 2024) der Vorkommen kritischer Rohstoffe in Deutschland mit darauf projizierten Rohstoffvorkommen der Abbildung 3.

6 Ausblick

Bisher (Stand Juli 2025) haben sich die hohen Ansprüche des CRMA und daraus abzuleitende Erwartungen Sachsen betreffend nur teilweise erfüllt. Eine bessere Darstellung der sächsischen Rohstoffpotenziale auf EU-Ebene zählt ebenso zu den zukünftigen Aufgaben, wie ein kurzfristig

zu beginnendes und insbesondere mit finanziellen und personellen Ressourcen untermetztes „echtes“, das heißt auf durchaus aufwändigen Geländearbeiten basierendes Explorationsprogramm. Ohne derartige Grundlagenarbeiten können auch weder „Künstliche Intelligenz“ noch sonstige Computer-generierte Prognoseverfahren wirkliche Erkenntnisfortschritte bringen beziehungsweise einen physischen Lagerstätten-nachweis mittels greifbarer Bohrkerne ersetzen.

Die vor etwa einem Jahrzehnt in der Lausitz abgeteufte Bohrungen zur Kupferschiefer-Erkundung waren mit Aufwendungen in Höhe mehrerer Millionen Euro verbunden und haben bisher aus verschiedenen Gründen nicht zum Start eines Bergbaus geführt. Derartige Investitionen allein zur Suche und Erkundung von Lagerstätten sind allerdings in dieser Branche erforderlich. Ohne entsprechende Bereitschaft, die notwendige Finanzierung zu sichern und damit verbundene Risiken einzugehen, machen (Rohstoff-)Strategien und Gesetze wie der CRMA wenig Sinn.

Die Anmeldung strategischer Projekte gemäß Abschnitt 2 Artikel 6 CRMA (2024) ist für Sachsen bisher erfolglos geblieben (vgl. Commission decision, 2025, PM 2025). Schwer nachvollziehbar ist unter anderem die EU-Entscheidung, von der grenzübergreifenden, deutsch-tschechischen Lithium-Lagerstätte Zinnwald – Cínovec nur das von der tschechischen Seite eingereichte Bergbau- und Aufbereitungs-Projekt („Cínovec Lithium Project“) als strategisch anzuerkennen, während ein auf deutscher Seite etwa gleichrangig vorangetriebenes Projekt abgelehnt wurde. Im Hinblick auf eine europäische Sicht, auf das Bestreben, die Rohstoffversorgung Europas mit Lithium sicherzustellen, erscheint eine solche Herangehensweise wenig hilfreich.

Vielleicht „drückt derzeit der Rohstoff-Schuh“ noch nicht genug: viele Beispiele zeigen, dass für höher eingestufte Prioritäten umfangreiche Mittel durchaus auch kurzfristig bereitgestellt und energische Initiativen zeitnah verwirklicht werden können. Eine sichere Rohstoffversorgung erfordert allerdings eine langfristige und umsichtige Planung und Umsetzung. Insofern liegt es nahe, nicht erst zu warten, bis sich die europäische Wirtschaft eine „Blase gelaufen hat“.

Bibliographie

Commission decision (2025): Commission decision of 25.3.2025 recognising certain critical raw material projects as Strategic Projects under

- Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council. <https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/d/d/workspace/SpacesStore/1958718b-21e9-40f4-9c9f-42a58dc4c5a3/download>. (22.07.2025).
- CRMA (2024): Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020 (Text von Bedeutung für den EWR). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252 (09.07.2025).
- EEG (2025): Erneuerbare-Energien-Gesetz. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html. (22.07.2025).
- FISRO (2025): Datenbank der Rohstoffvorkommen Sachsens. Staatlicher Geologischer Dienst Sachsens, Referat Rohstoffgeologie, <https://www.geologie.sachsen.de/rohstoffgeologie-13382.html>.
- GSEU (2022): A Geological Service for Europe. A Geological Service for Europe | GSEU | Projekt | Fact Sheet | HORIZON | CORDIS | European Commission (21.07.2025).
- Henning, Sören / Szurlics, Michael / Graupner, Torsten / Eicke, Corinna (2024): Kritische mineralische Rohstoffe in Deutschland – Gewinnung und Exploration. *Commodity Topnews*, 73, BGR. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/73_Kritische_mineralische_Rohstoffe.pdf?__blob=publicationFile&v=3. (21.07.2025).
- KOM (2011): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0025&qid=1752038812784> (09.07.2025).
- KOM (2014): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?>

- uri=CELEX:52014DC0297 (09.07.2025).
- KOM (2017): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490> (09.07.2025).
- KOM (2020): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474> (09.07.2025).
- KOM (2023): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:903d35cc-c4a2-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF (09.07.2025).
- KOM (2024): Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020 (Text von Bedeutung für den EWR). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252 (09.07.2025).
- LfULG (2025): Rohstoffrelevante Unterlagen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (unter anderem Fachinformationssystem Rohstoffe FISRO, Vorgangsverwaltungsprogramm VISSAX und weitere), unveröffentlicht.
- MAP (2024): Critical raw materials hard rock deposits of Europe. https://www.geologicalservice.eu/upload/content/1495/crm_map_2023_v6_hq3.pdf. (21.07.2025 im Internet nicht mehr auffindbar)
- MAP (2025): Map of Critical Raw Materials hard rock deposits of Europe. <https://www.geologicalservice.eu/publications/map-of-critical-raw-materials-hard-rock-deposits-of-europe> (18.07.2025).

- PM (2025): 47 strategische Projekte ausgewählt: Zugang zu kritischen Rohstoffen sichern und diversifizieren. Pressemitteilung 25. März 2025. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/47-strategische-projekte-ausgewahlt-zugang-zu-kritischen-rohstoffen-sichern-und-diversifizieren-2025-03-25_de (22.07.2025).
- SOBA (2025): Karte und Liste erteilter Bergbauberechtigungen auf Erze und Spate. <https://www.oba.sachsen.de/erze-und-spate-4531.html> (18.07.2025).
- Steckbriefkatalog (2008): Neubewertung von Spat- und Erzvorkommen im Freistaat Sachsen. <https://www.geologie.sachsen.de/download/Steckbriefkatalog.pdf> (09.07.2025).

Rohstoffgeologische Erfassung des Schwermineralpotenzials in Ostseesanden in Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen des Projektes SEEsand

Andreas Börner¹, Mirko Martin², Henrik Rother³, Axel Schippers⁴, Karsten Schütze¹

(¹Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Geologischer Dienst, (LUNG MV), Goldberger Str. 12b, 18273 Güstrow, ²G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Fachbereich Verfahrensentwicklung/Biotechnologie, Schwarze Kiefern 2, 09633 Halsbrücke, ³Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Geologischer Dienst; An der Fliederwegkaserne 13, 06130 Halle/Saale, ⁴Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), B1.5 – Arbeitsbereich Geomikrobiologie, Stilleweg 2, 30655 Hannover)

Abstract

The generic term “rare earth elements” (SEE) stands for a group of 17 metals with special optical, electrical, magnetic and catalytic properties that are needed for almost all important key technologies of the 21st century. Marine sands of the Baltic Sea contain heavy minerals including minor amounts of SEE. Primarily, the sands are being extracted in large quantities for the use in the construction industry and for coastal protection measures. This continuous bulk extraction offers the possibility for the separation of the heavy mineral fraction present in the sands including the extraction and recovery of SEE via (bio)leaching and biosorption

being examined between 2016-2019 in the joint BMBF-funded “SEEsand” research project. The Geological Survey of Mecklenburg-Western Pomerania digitized and processed analog exploration data sourced from exploration activities during the 1970-80th and complemented by newer data obtained between 1992-2017 and re-evaluated their raw material potential. A total of 15 exploration fields covering 5,057 km² have been identified, for which information is available on 40,349 strata from 7,164 geological exploration boreholes and the heavy mineral content from 21,526 strata from the Baltic Sea area of Mecklenburg-Western Pomerania. For a statistical calculation, the heavy mineral distribution was represented spatially through a GIS application, based on laboratory-determined grain size distributions together with heavy mineral contents and model values, which were averaged to the most frequently occurring grain mixtures. The heavy mineral contents of the individual strata were used for a quantitative calculation of the fine sand fraction (0.063-0.2 mm) showing the highest heavy mineral contents. For the western fields a heavy mineral potential of 106,083 t including 5,124 t zircon was calculated. For the eastern part the estimated heavy mineral potential was calculated to be 313,058 t including 22,384 t of zircon. The balanced heavy mineral potentials including the quantities of the valuable mineral zircon can only be assessed as estimated potentials or as “indicated resources” according to the United Nations Framework Classification (see UNFC 2009).

Resümee

Der allgemeine Begriff „Seltene Erden“ (SEE) steht für eine Gruppe von 17 Metallen mit besonderen optischen, elektrischen, magnetischen und katalytischen Eigenschaften, die für fast alle wichtigen Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts benötigt werden. Marine Sandvorkommen der Ostsee enthalten Schwerminerale, einschließlich geringer Mengen von SEE. Primär werden die Sande in großen Mengen für die Verwendung in der Bauindustrie und für Küstenschutzmaßnahmen abgebaut. Dieser kontinuierliche Massenabbau bietet die Möglichkeit, die in den Sanden vorhandene Schwermineralfraktion abzutrennen, einschließlich der Extraktion und Rückgewinnung von SEE durch (Bio-)Laugung und Biosorption, was zwischen 2016-2019 im vom BMBF geförderten Verbundforschungsvorhaben „SEEsand“ untersucht wurde. Der Geologische Dienst im Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG MV) digitalisierte und bearbeitete

die im LUNG-Archiv vorhandenen analogen Erkundungsdaten zu küstennahen marinen Sandvorkommen der Ostsee sowie deren Schwermineralanteile und bewertete das diesbezügliche Rohstoffpotenzial komplett neu. Unter Hinzuziehung neuer Erkundungsdaten aus den Jahren 1992-2017 wurden 15 Erkundungsfelder auf insgesamt 5.057 km² aus dem Ostseebereich Mecklenburg-Vorpommerns ausgewiesen, in welchen Informationen zu 40.349 Schichten aus 7.164 geologischen Erkundungsbohrungen und Schwermineralgehalte aus 21.526 Schichten, also aus etwa 50 % der erkundeten Schichten, vorlagen. Für eine Perspektivbewertung wurde die Schwermineralverteilung mittels einer GIS-Anwendung flächenhaft dargestellt, basierend auf im Labor ermittelten Korngrößenverteilungen nebst Schwermineralgehalten und Modellwerten, welche auf die am häufigsten vorkommenden Korngemische gemittelt wurden. Die ermittelte Feinsandfraktion im Korngrößenbereich 0,063-0,2 mm mit der höchsten Schwermineralhöflichkeit wurde für eine quantitative Berechnung der Schwermineralgehalte der Einzelschichten genutzt. Für den Westteil wurde ein Schwermineralpotenzial von 106.083 t inklusive 5.124 t Zirkon berechnet. Im Ostteil betrug das geschätzte Schwermineralpotenzial 313.058 t inklusive 22.384 t Zirkon. Die bilanzierten Schwermineralpotenziale inklusive der Mengenangaben zum Wertmineral Zirkon können nur als geschätzte Potenziale bzw. nach der United Nations Framework Classification (vgl. UNFC 2009) als „indicated resource“ bewertet werden.

Keywords/Schlüsselwörter

Rare earth elements, heavy minerals, marine sands, Baltic Sea, indicated resource, Mecklenburg-Western Pomerania, mineral processing, (bio)leaching

Seltene-Erden-Elemente, Schwerminerale, marine Sande, Ostsee, geschätzte Rohstoffpotenzial- Mecklenburg-Vorpommern, Mineralverarbeitung, (Bio-)Laugung

1 Einführung

Jährlich werden hunderttausende Tonnen Sand gewonnen, die der Wiederherstellung erodierter Strandbereiche oder für anderweitige Bauzwecke dienen. Die in den Sanden enthaltenen Schwerminerale sind bisher

von untergeordnetem Interesse. Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojektes „SEEsand – Gewinnung schwerer Seltenerdelemente (SEE) aus Schwermineralsanden“ digitalisierte und bearbeitete der Geologische Dienst im Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG MV) zwischen 2016-2019 die im Archiv vorhandenen analogen Erkundungsdaten vom Zentralen Geologischen Institut (ZGI) der DDR bewertete das Rohstoffpotenzial komplett neu.

Ziel des Verbundprojektes SEEsand war die Gewinnung wirtschaftsstrategisch bedeutender Schwerer Seltenerdelemente (SSEE) aus Schwermineral-führenden Sanden aus der Ostsee. Der Oberbegriff der Seltenen Erden Elemente (SEE) steht für eine Gruppe von 17 Metallen mit speziellen optischen, elektrischen, magnetischen und katalytischen Eigenschaften. SEE werden für nahezu alle wichtigen Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts benötigt und sind ein unentbehrlicher Rohstoff für die High-Tech Industrie (vgl. Erdmann 2021). Ein Großteil der weltweiten SEE-Produktion ist in China konzentriert (vgl. Berners 2024). Aufgrund dieser Monopolsituation und daraus resultierender potentieller Preisinstabilitäten sowie Versorgungsrisiken hat die Europäische Union mehrere SEE der Liste sogenannter „Kritischer Rohstoffe“ hinzugefügt. Für Deutschland als Industrienation mit breiter High-Tech-Produktionsbasis ist die Verfügbarkeit von SEE-Rohstoffen eine unabdingbare industrielle Voraussetzung.

Die Projektpartner erarbeiteten während der dreijährigen Projektlaufzeit 2016-2019 unter Leitung der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft Freiberg neue Verarbeitungs- und Extraktionsansätze von SEE-Ressourcen (vgl. Martin et al. 2020). Marine Ostseesande werden in großen Mengen für eine Verwendung in der Bauindustrie und zum Küstenschutz (Strandaufspülungen) aus dem küstennahen Ostseebereich gewonnen. Diese kontinuierliche Massenförderung bietet die Möglichkeit, die in den Sanden vorhandene Schwermineralfraktion abzutrennen. Unter den gewinnbaren Schwermineralen befindet sich u.a. das Ziel-Mineral Zirkon, in dem SEE in niedriger Konzentration angereichert sind (vgl. Becker et al. 1986, Hedrich et al. 2023). Projektziel war die Entwicklung einer Technologie zur effektiven Abtrennung des Schwermineralanteils aus marinen Sanden, die aktuell unter Einsatz von Saugbaggerschiffen gefördert werden. Im Rahmen des Projekts erfolgte die testweise technische

Aufbereitung der Ostseeproben an der Technischen Universität Clausthal (ehemaliges Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, jetzt Abteilung im Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme). Für die Gewinnung von SEE fokussierte das Projekt zwar auf das Wertmineral Zirkon, gleichwohl fallen im Aufbereitungsprozess auch relevante Mengen anderer Schwerminerale an, wie z.B. Granat (Verwertung als Schleifmittel oder Sandstrahlmedium) oder Rutil und Ilmenit (Titankonzentrat mit Verwertung in der Pigmentindustrie), welche bei entsprechender Vermarktung die Wirtschaftlichkeit einer Gewinnung deutlich steigern können.

Das Projekt befasste sich mit dem technischen Herauslösen von SSEE aus dem Wertmineral Zirkon mit innovativen geo-biotechnologischen Verfahren. Im besonderen Fokus der Untersuchungen standen dabei die SSEE Yttrium, Dysprosium, Terbium und Ytterbium. Biomining mit autotrophen Mikroorganismen ist bei der Aufbereitung von nicht-sulfidischen Erzen (z.B. Zirkon) z.Zt. weltweit Gegenstand der Forschung, wie z.B. im Arbeitsbereich Geomikrobiologie des Projektpartners Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover. Laugungsbakterien sind autotrophe, aerobe, azidophile Fe(II)- und/oder Schwefelverbindungen oxidierende Arten wie z.B. *Acidithiobacillus ferrooxidans* (vgl. Glombitza et al. 1988, Hedrich et al. 2023). Wissenschaftlich-technologisches Hauptziel des Projektes war die Entwicklung effizienter und umweltfreundlicher Technologien zur Gewinnung der SEE. Dazu wurden die Komponenten des Ostseesandes zunächst nach ihrer Dichte sortiert, u.a. durch Nutzung von Wendelscheidern und Schüttelherden. Die so extrahierten fast-reinen Quarzminerale könnten vielfältig in der Baustoff- und Glasindustrie oder als Basisminerale zur Fertigung von Siliziumwafern oder in der Solarindustrie eingesetzt werden.

Durch Anwendung von Magneten verschiedener Stärke und elektromagnetischen Trennverfahren konnten an der Technischen Universität Clausthal folgende schweren Mineralanteile großtechnisch aufgetrennt werden (Ma/Elwert 2018):

- stark magnetischer Magnetit;
- schwächer magnetischer Ilmenit;
- schwach magnetischer Granat (etwa 80 Prozent des Gehalts an Schwermineralen);
- nicht magnetischer Zirkon.

2 Schwerminerale in Ostseesanden

Glazigene und post-glazigene, marine bis randmarine Sedimentations- und Erosionsprozesse prägen im Ostseebecken die Sedimentverteilung und Umlagerung von Sedimenten und Gesteinen, die ursprünglich aus dem fennoskandischen Liefergebiet stammen (Kolp et al. 1969). Sediment-beladene Entwässerungsflüsse der Gletscher bilden ausgedehnte Sander. Die Gletscher und die Gletscher-Flüsse lieferten die Schwermineral-führenden Gesteine und Sedimente bzw. deren Erosionsprodukte, welche im Ostsee-Becken sedimentiert wurden und durch Bodenströmungen noch immer der Umlagerung unterworfen sind und von holozän umgelagerten Sedimenten überdeckt werden (Kolp et al. 1969). Zudem prägten die spät-pleistozäne Entwicklung und assoziierte Transgressionen und Regressionen maßgeblich die Sedimentverteilung in der heutigen Ostsee. Dabei wurden glazigene Ablagerungen aufgearbeitet und in Abhängigkeit von Dichte und Kornform strömungsindiziert transportiert.

Im Projektfokus stand insbesondere das Wertmineral Zirkon, dessen Genese an die Frühkristallisation von Graniten, Dioriten, und Syeniten gebunden ist und dessen hohe Verwitterungsresistenz dieses Mineral als wichtigen Bestandteil von Strandseifen prädestiniert (vgl. Elsner 2006, 2010). Im Ostseebereich wurden durch Meerestransgressionen und -regressionen Schwerminerale in Abhängigkeit ihrer spezifischen Dichte im sedimentären Umlagerungsprozess z.B. in Form von Strandseifen konzentriert (vgl. Pfeiffer 1972). Die Strandseifen bilden sich auch heute noch dort, wo ein Küstenabschnitt instabil ist bzw. eine negative Massenbilanz aufweist und der Strand im Mittel nicht breiter als 25 m ist (vgl. Pfeiffer 1963). Diese quasi-rezenten Strandseifen wurden in den 1960er Jahren manuell per Spaten für die Schwermineralgewinnung abgebaut (vgl. Pfeiffer 1972). Die durchschnittlichen Gehalte an Schwermineralen im Fördergut lagen bei 15 bis 20, teilweise bei 30 %. Der Schwermineral-Anteil bestand in der Regel aus 50 % Granat, 20 % Ilmenit, 10 % Magnetit, 2 bis 3 % Zirkon und etwa 0,2 % Monazit (vgl. Hetzer 2006). Für die Förderung von Strandseifen des Jahres 1961 liegen in Pfeiffer (1963) detaillierte Angaben vor: Gesamtförderung 3.600 t Schwermineral-Sand mit einem Gehalt von 19 % Schwermineralen (= 684 t). Daraus wurden im Aufbereitungsprozess 28,5 t Zirkon-Konzentrat gewonnen (= ca. 4 % Zr). Da der Küstenschutz und die Entwicklung des Tourismus in

Mecklenburg-Vorpommern Priorität haben, kann man eine Gewinnung des Schwermineralpotenzials von Strandseifen unter den heutigen Rahmenbedingungen ausschließen.

3 Archivgut im LUNG MV – Sichtung, Bearbeitung und Bewertung

Das Zentrale Geologische Institut (ZGI) der DDR dehnte die Exploration auf marine Sande offshore in der südlichen Ostsee in der Hoffnung aus, um den nationalen Bedarf an bestimmten Schwermineralen ohne Importe decken zu können. Zahlreiche Erkundungsfahrten wurden deshalb in den 1970er bis 1980er Jahren unternommen (vgl. Neumann/Bublitz 1969, Weinert/Stephan 1982, 1983, 1985). Für die Probennahmen wurden Vibrationskerngeräte (VKG) genutzt. Der Van-Veen-Bodengreifer mit einem Sedimentgewinn von $\sim 0,1 \text{ m}^3$ wurde für die Gewinnung von Oberflächensedimenten benutzt.

Im Archiv des LUNG MV fand sich dieser Schatz wissenschaftlicher Berichte u. a. mit 20.869 Schwermineraldaten aus den Jahren 1971-2015, der als Wegweiser zu höffigen Sandlagerstätten nutzbar gemacht wurde. Durch die Projektbearbeitung im LUNG Mecklenburg-Vorpommern wurden 2019 anhand dieser, nun digital nutzbaren Daten eine quantitative Einschätzung zur Höffigkeit mariner Ostseesande mit Hinblick auf den Gehalt an Schwermineralen und mit dem Fokus auf das Wertmineral Zirkon erarbeitet. Grundlage hierfür waren umfangreiche geologische Daten zu marinen Kiessanden des Ostseeschelfs (Erhebung der Daten durch die DDR im Zeitraum 1970-1989), die für das Projekt digitalisiert und komplett neu ausgewertet wurden. Die Berichte über die Explorations-Tätigkeiten des ZGIs in der östlichen und westlichen Ostsee sind in zwei Berichten zusammengefasst (vgl. Weinert/Stephan 1983, 1985). Unter Hinzuziehung neuer Erkundungsdaten aus den Jahren 1992-2017 wurden 15 Erkundungsfelder auf insgesamt 5.057 km^2 ausgewiesen, in welchen Informationen zu 40.349 Schichten aus 7.164 geologischen Erkundungsbohrungen aus dem deutschen Ostseebereich vorlagen. Insgesamt wurden im Rahmen der Erkundungen die Schwermineralgehalte (SMG) von 21.526 Schichten aus 7.164 Bohrungen bestimmt (Tabelle 1).

Feld	Bohrungen (Anzahl/km ²)	Schichten	SM- Mess- werte	SM- Modell- werte (Anzahl)	SM- Mittel- werte [Masse- %]
Landtief (Ostfeld)	404 (2,1)	2.332	1.820	38	0,46 [0,34]
Osttief (Ostfeld)	590 (1,0)	4.423	3.567	305	0,44 [0,31]
Ostrügen (Ostfeld)	118 (0,1)	596	384	110	0,59 [0,54]
Adlergrun Nord (Ostfeld)	808 (3,2)	3.960	2.943	473	0,63 [0,35]
Adlergrund Süd (Ostfeld)	280 (1,3)	4.377	767	8	0,74 [0,54]
Greifswalder Bodden (Ostfeld)	284 (0,9)	2.252	1.382	148	0,72 [0,4]
Boddengewässer (Ostfeld)	119 (0,5)	476	96	78	0,42 [0,21]
Tromper Wiek (Ostfeld)	486 (7,1)	2.737	1.676	531	0,93 [1,08]
Prorer Wiek (Ostfeld)	143 (0,6)	636	552	213	0,37 [0,23]
Wismarbucht (Ostfeld)	225 (2,1)	803	140	189	0,86 [0,12]
Westlich Darß (Westfeld)	525 (1,7)	2.403	1.512	656	0,44 [0,26]
Plantagenetgrund	1379 (2,1)	6.612	2.863	2.443	0,5

(Westfeld)					[0,43]
Stoltera West (Westfeld)	561 (8,0)	2.985	1.572	742	0,75 [1,81]
Darßer Schwelle (Westfeld)	358 (2,2)	1.477	903	242	0,52 [0,39]
Markgrafen- heide-Nord (Westfeld)	884 (4,6)	4.280	1.349	1.946	0,57 [0,44]
Gesamt	7.164	40.349	21.526	8.122	

Tab. 1: In Aufsuchungsfelder unterteilte Daten zu abgeteufte Bohrungen, untersuchten Schichten und Schwermineralanalysen, bestimmt aus der Fraktion 0,063-1,0 mm (vgl. Weinert/Stephan 1983, 1985). Bei fehlenden Schwermineraldaten wurden korngößenabhängig „SM-Modellwerte“ jeweils für die 15 Aufsuchungsfelder eingesetzt. SM = Schwermineral; [xx] = Standardabweichung des mittleren Schwermineralgehaltes.

3.1 Probenaufbereitung und Schwermineralanalysen im Überblick

Die getrockneten Schwergut-Proben wurden nach der Dichtesortierung über den Riffelteiler in aliquote Teile gesplittet. Gesiebt wurde das trockene Rohmaterial mithilfe der Standardsiebe nach TGL 0-4188 (1965). Es wurden in den Ost-Feldern (vgl. Weinert/Stephan 1983) die Fraktionen 0,063-0,1 mm und 0,1-0,2 mm getrennt voneinander schwermineralanalytisch analysiert. In den West-Feldern wurden die Fraktionen 0,063-0,1 mm, 0,1-0,2 mm, 0,2-0,25 mm und 0,25-0,315 mm getrennt voneinander betrachtet. Es wurden 20 g (Trockengewicht) pro Probe analysiert (vgl. Weinert/Stephan 1985), um die Einzelkörner mikroskopisch zu bestimmen. Die kornweise Bestimmung der Schwerminerale erfolgte unter dem Durchlichtmikroskop an einem Streupräparat in dem Einbettungsmittel Gelatine (vgl. Weinert/Stephan 1983, 1985) standardmäßig mit Jodbenzol (Lichtbrechung $n = 1,62$) als Lichtbrechungsflüssigkeit. Es wurden 587 bis 3460 Schwermineralkörner in Gruppenkonzentraten und in kompletten Kernen bestimmt und die Kornprozent (Korn-%) und Masseprozent (Masse-%) der einzelnen Schwerminerale angegeben (vgl. Weinert/Stephan 1983, 1985). Das ZGI hat folgende transparente

SMG mikroskopisch ermittelt: Turmalin, Zirkon, Rutil, Anatas, Brokit, Titanit, Disthen, Staurolith, Silimanit, Granat, Epidot, Hornblende, Pyroxene, Monazit, Apatit, Ilmentit und Magnetit. Innerhalb der opaken Minerale wurden 60 %, bzw. 80 % als Ilmenit und 40 % bzw. 20 % als Magnetit eingeschätzt (vgl. Weinert/Stephan 1983, 1985).

3.2 Methodik von der Punktinformation zur flächenhaften Kalkulation

Da keine geochemischen Analysen vorlagen, war es für die Berechnung des nutzbaren Schwermineral-Gehaltes erforderlich, die ermittelten Korn-%-Anteile in Masse-%-Anteile näherungsweise umzurechnen (vgl. Weinert/Stephan 1983). Der Wert Korn-% entspricht in dieser Berechnung dem Volumenprozent (Volumen-%) im Körnerpräparat. Die mittleren Korndurchmesser der Fraktionen 0,1-0,2 mm und 0,063-0,1 mm entsprechen 0,15 mm und 0,0815 mm. Damit ist das mittlere Volumen $\bar{v} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$; entsprechend 0,001767 mm³ und 0,000285 mm³. Die ausgezählten Körner der einzelnen Minerale (z.B. die Zirkonkörner) wurden mit dem mittleren Volumen der Fraktion multipliziert: 208 Zirkonkörner · 0,000285 mm³ = 0,00593 mm³. Dieses Produkt wurde daraufhin mit der Dichte des Minerals (im Beispiel Zirkon mit einer Dichte von 43 mg mm⁻³) multipliziert: 0,00593 mm³ · 43 mg mm⁻³ = 0,255 mg. Dieser Wert gibt das Gewicht der enthaltenen Mineralkörner im Körnerpräparat wieder. Die Masse-%-Anteile der transparenten Körner (u.a. Zirkonkörner) am Gesamtgewicht der gezählten Körner entspricht dem Gewicht aller transparenten Körner geteilt durch das Gewicht der gezählten Körner multipliziert mit 100. Für die Masse-%-Anteile der Zirkonkörner an der Gesamtmasse gilt: $\frac{0,255 \text{ mg}}{1,8473 \text{ mg}} \cdot 100 = 13,8 \text{ Masse-\%}$.

3.3 Quantitative Berechnung von Schwermineralgehalten

Das Schwermineralpotenzial einer Nutzschiefer ist von mehreren Faktoren abhängig:

1. der Kornzusammensetzung,
2. der Schwermineralführung,
3. der Schichtmächtigkeit.

Die labortechnisch ermittelte Kornzusammensetzung und deren SMG lagen für 21.526 Proben aus 7.164 Bohrungen vor (vgl. Weinert/Stephan 1983, 1985). Für die Berechnung der gewinnbaren Nutzschiehtmächtigkeit wurden immer 50 cm vom Gesamtprofil oder über einer nicht nutzbaren Gesteinsschicht abgezogen, da nach bergrechtlichen Vorgaben zur ökologischen Umweltverträglichkeit von marinen Sandabbauprojekten mindestens eine 50 cm mächtige Lockersedimentschicht über dem nicht nutzbaren Gesteinshorizont erhalten bleiben muss. Die kalkulierte Nutzschiehtmächtigkeit von Sand- und Kiessandsedimenten abzüglich 50 cm Restbedeckung wurde in einem 50 m-Raster im GIS berechnet. Ausgehend von „Primär-Rastern“ mit einer Bohrung werden die dazwischenliegenden Raster durch Interpolation der benachbarten Primär-Raster statistisch kalkuliert. Das Primär-Raster in der zentralen weißen Fläche ohne Nutzschiehtpotenzial wirkt sich nur so weit auf die benachbarten Flächen aus, bis der „statistische“ Einfluss benachbarter Primärflächen zunimmt. In dieser Form beeinflussen die belegbaren „Primär-Daten“ der „Primär-Raster“ die zwischenliegenden Raster in Abhängigkeit von Entfernung und Datendifferenz. Das Potenzial eines Gebietes ist direkt abhängig von der Nutzschiehtmächtigkeit. Ist die Nutzschiehtmächtigkeit ≤ 50 cm, ist kein gewinnbares Abbaupotenzial vorhanden (Abbildung 1).

Für die hier vorliegende Potenzialermittlung wurde der oberste Meter der gewinnbaren Nutzschieht in die darin enthaltenen Schichten je nach Schichtmächtigkeit prozentual aufgeteilt (Summe = 100 %). Der angewandte Berechnungsmodus wird kurz für die Bohrung #619 im Feld Adlergrund Süd exemplarisch vorgestellt (Abbildung 2). Die prozentual bekannten SMG der Einzelschichten wurden für eine quantitative Berechnung mit dem SM-höufigsten Korngrößenbereich 0,063-0,2 mm genutzt (nur der Feinsand, Abbildung 2): oberste Schicht 15 cm mit 46,8 % Feinsandanteilen und einem SMG von 1,3 %. Die relevanten Schichtkomponenten wurden prozentual für das Gesamt-Korngrößenspektrum des obersten Meters berechnet. Daraus resultiert für den obersten Meter ein SMG von 0,844 % bzw. einem Schwermineralpotenzial von 8,44 kg/t incl. 82,68 g Zr bei 100-prozentiger technischer Aufbereitungsquote. Das entspricht bei einer Umrechnung von Gewicht (t) auf Volumen (m³) mit einem Faktor x1,75 eine Schwermineralpotenzial von 14,77 kg incl. 144,69 g Zr.

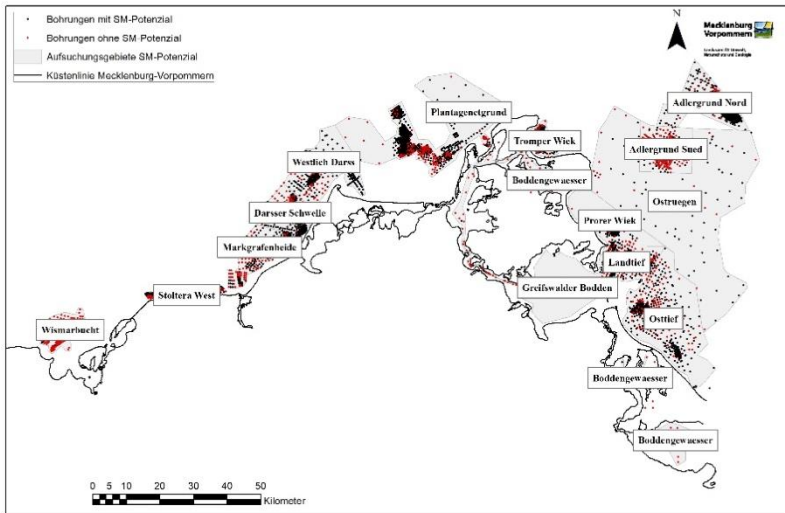


Abb. 1: Flächenausdehnungen der 15 untersuchten Felder basierend auf der Lage der Bohrungen der Erkundungsfelder aus Tabelle 1 und entsprechend den Flächenmaßen, auf welche sich die weiteren Bilanzierungen beziehen. (SM = Schwerminerale).

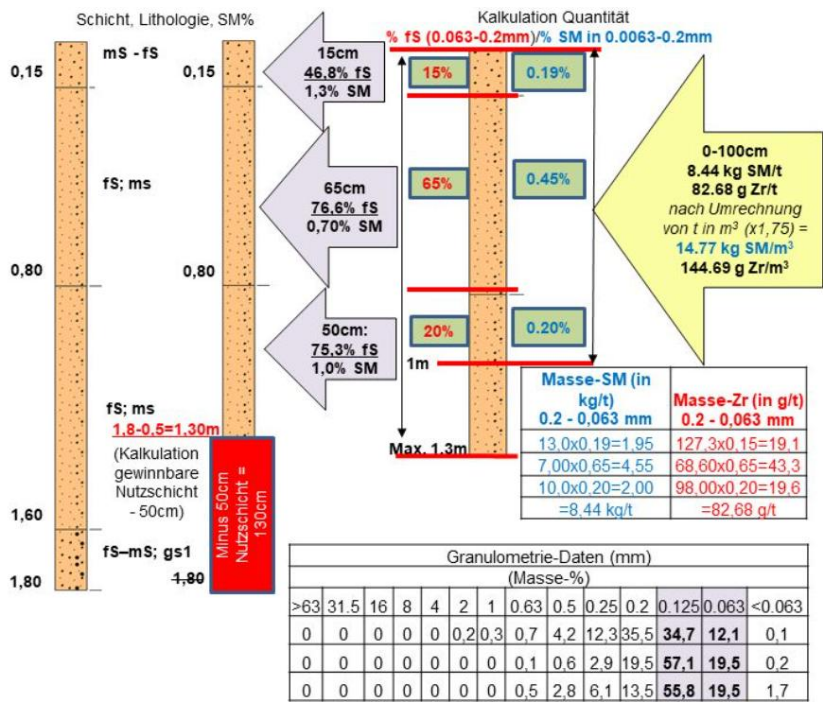


Abb. 2: Berechnungsmodus für eine beispielhafte Bohrung #619 im Aufsuchungsfeld Adlergrund Süd. (fs = Feinsand; mS = Mittelsand; ms = mittelsandig; fs = feinsandig; SM = Schwerminerale).

Die 15 Erkundungsfelder sind in eine Region „Ost“ mit Landtief, Osttief, Ostrügen, Adlergrund Nord, Adlergrund Süd, Greifswalder Bodden, Boddengewässer, Tromper Wiek und Prorer Wiek, und eine Region „West“ mit Darßer Schwelle, westlich Darß, Plantagenetgrund, Stoltera West, Wismarbucht und Markgrafenheide untergliedert (Abbildungen 2 und 6). Diese Untergliederung basiert neben der räumlichen Gliederung auf der unterschiedlichen Schwermineralführung: die Ost-Felder enthalten im Mittel mehr Schwerminerale als die West-Felder (vgl. Weinert/Stephan, 1983). Da nicht für alle Bohrungen bzw. Schichten Labordaten für die SMG vorliegen, wurden für diese Schichten anhand der bekannten SMG aus Schichten mit laborativ ermittelter Korngrößenzusammensetzung neue Mittelwerte für diese Schichttypen statistisch berechnet: Korngrößenabhängige Schwermineral-Mittelwerte Felder-Ost und Korngrößenabhängige Schwermineral-Mittelwerte Felder-West. Für

die einzelnen Felder wurden Mittelwerte für Kornverteilung und Schwermineralgehalt (SMG) der auftretenden Kornzusammensetzungen ermittelt, die für 8.122 nicht labortechnisch untersuchte Schichten für eine umfassende Gesamtberechnung eingesetzt wurden. Anhand von gewichteter Mittelwertbildung wurde der SMG (in Masseprozent = Masse-%) auf Schichten ohne Schwermineralanalysedaten extrapoliert, wenn diese eine vergleichbare Kornverteilung aufwiesen. Dies erfolgte jeweils getrennt für die regional getrennten Felder-Ost und die Felder-West, so dass nun Informationen zu SMG für 73 % der Schichten vorliegen. Für etwa 10 % konnten keine SMG ermittelt werden, da es sich um Torfe oder um bindige Ablagerungen wie Geschiebemergel, Steine, Kieslagen, Beckentone oder marinen Schlick handelt, die nicht näher untersucht wurden. Für 15 % der Lockersedimente konnten aufgrund fehlender Labordaten keine SMG zugeordnet werden. Im nächsten Schritt wurden nun feldbezogen die Korngrößenabhängigen Modellwerte übernommen und zwar dort, wo zwar eine Korngrößenbestimmung, aber keine Schwermineralbestimmung erfolgte. Bei der Berechnung wurden nur die ersten drei Korngrößen-Mengenanteile berücksichtigt. Es wurden 8.122 fehlende Schwermineralinformationen innerhalb der nicht-bindigen Schichten des gesamten Schichtdatensatzes (40.349 Schichtdaten) mit den oben genannten Korngrößenabhängigen Schwermineral-Mittelwerten für die Regionen Felder-Ost und Felder-West gefüllt (Tabelle 2).

	SM-Anteil	SM-Anteil	SM-Anteil	SM-Anteil
	0,063- 0,1 mm	0,1- 0,2 mm	0,2- 0,25 mm	0,25- 0,315 mm
	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
Plantagenetgrund	10,40	0,80	0,10	
Darßer Schwelle	4,70	25,70	15,10	15,10
Kühlungsborn Ost	4,10	20,00	12,30	13,30
Markgrafenheide	1,80	16,40	12,70	13,30
Markgrafenheide Ost	3,80	12,20	6,90	9,20
Plantagenetgrund Nord	4,40	23,50	6,90	
Mittelwert West	4,87 [2,6]	16,43 [8,3]	9,00 [4,9]	12,73 [2,2]
Oderbank	8,37	0,40	n.e.	n.e.

Osttief	1,30	0,50	n.e.	n.e.
Adlergrund Süd	7,00	0,40	n.e.	n.e.
Landtief	2,90	0,40	n.e.	n.e.
Mittelwert Ost	4,89 [2,9]	0,43	n.e.	n.e.

Tab. 2: Korngrößenabhängige Mittelwerte der Schwermineralanteile in den vom ZGI untersuchten Aufsuchungsfeldern, aufgeteilt in West- und Ostfelder, die für die weitere Bilanzierung eingesetzt wurden. SM: Schwermineral; [x]: Standardabweichung des mittleren Schwermineralgehaltes, n.e. = nicht ermittelt.

Die in Tabelle 3 prozentual dargestellten sechs Wertminerale entstammen der Gruppe „transparente Mineralkörner“ mit insgesamt 17 Schwermineraltypen. Innerhalb der transparenten Mineralkörner schwanken die Anteile der Schwerminerale prozentual lage- und korngrößenabhängig, z.B. sind die höchsten Anteile von z.B. Zirkon in der Fraktion 0,063-0,1 mm und die höchsten Granat-Anteile in der Fraktion 0,1-0,2 mm zu finden. Für diejenigen Felder, für die keine detaillierten Schwermineraluntersuchungen vorlagen, wurden die regionalen Mittelwerte herangezogen (Tabelle 2), um die lokalen SMG für jede Erkundungsbohrung kalkulieren zu können, z.B. der Mittelwert 9,21 % für den Zirkongehalt in der Kornfraktion 0,063-0,1 mm in den Ost-Feldern Adlergrund Süd, Landtief, Osttief und Oderbank (Tabelle 3). Hierbei wird eine Lageabhängigkeit vorausgesetzt: die Ost-Felder und die West-Felder bilden jeweils getrennte Schwermineral-Assoziationen mit differenzierten Mittelwerten.

	Fraktion [mm]	Zirkon [%]	Rutil [%]	Granat [%]	Apatit [%]	Ilmenit [%]	Magnetit [%]
Felder Ost	0,063-0,1	9,21	1,67	14,22	0,69	25,3	11,66
	0,1-0,2	5,09	0,88	14,3	0,57	23,26	10,56
Felder West	0,063-0,1	7,47	1,18	13,49	0,50	34,57	10,09
	0,1-0,2	2,19	0,56	15,99	0,64	34,86	10,56
	0,2-0,2	0,44	0,21	19,59	0,36	38,51	9,96
	0,25-0,315	n.e.	n.e.	14,30	0,38	39,99	11,07

Tab. 3: Anhand von im Labor durchgeführten Schwermineralanalysen berechnete Mittelwerte (Masseprozent) ausgewählter Schwerminerale für die Felder Ost: Adlergrund Süd, Landtief, Osttief, Oderbank und für die Felder West: Stoltera West, Markgrafenheide, Darßer Schwelle und Plantagenetgrund; n.e. = nicht ermittelt.

4 Ergebnisse und Bewertung durch flächenhafte Kalkulation im GIS

Für eine Perspektivbewertung wurde die Schwermineralverteilung mittels einer GIS-Anwendung in Karten flächenhaft dargestellt, basierend auf im Labor ermittelten Korngrößenverteilungen nebst SMG und den Modellwerten, die auf die am häufigsten vorkommenden Korngemische gemittelt wurden. Die räumliche Abschätzung der Verteilung der Nutzschiehtmächtigkeit und der SMG erfolgte mit ArcGIS (Version 10.3.1). Bei dieser Methode wurde die Information einer Bohrung auf eine Rasterfläche von $2.500 \times 2.500 \text{ m} = 2,5 \text{ km}^2$ Zellengröße interpoliert (Primärzelle). Die statistische Interpolation der zwischen den Primärzellen liegenden Rasterflächen (Sekundärzellen) erfolgte mit der Interpolations-Methode „Natürlicher Nachbar“. Die SMG sind gebietsbezogen und korngrößenbezogen verschieden. Die höchsten Werte in den West-Feldern wurden generell in der Fraktion 0,1-0,2 mm ermittelt (vgl. Weinert/Stephan 1985); in den Ost-Feldern sind in der Fraktion 0,063-0,1 mm die höchsten SMG zu finden (Tabelle 2). Sowohl hohe SMG in einer relativ geringmächtigen Nutzschieht als auch relativ niedrige SMG in einer mächtigen

gewinnbaren Nutzschrift erzeugen ein hohes Potenzial, wobei eine ökonomische Gewinnung im ersten Fall deutlich besser darstellbar ist. Die Daten zur gewinnbaren Nutzschriftmächtigkeit, der Gehalte (prozentuale SMG gemittelt über die Nutzschrift, die SMG in kg/m^3 und Zirkongehalte in g/m^3 im obersten Meter) und der Potenzialgebiete (gemittelte SMG über die individuelle Nutzschrift in kg/m^3) wurden für die 15 Erkundungsfelder in getrennten Potenzialkarten dargestellt (Abbildungen 3 bis 6).

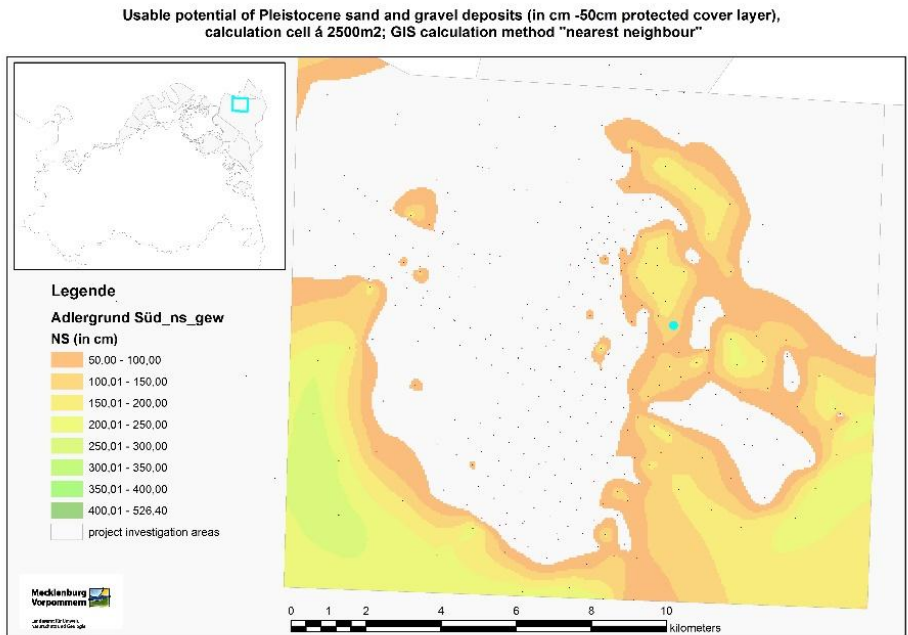


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung der gewinnbaren Nutzschriftmächtigkeit für das Aufsuchungsfeld Adlergrund Süd. Die etwas vergrößerte hellblaue Punktmarkierung zeigt die Lage der Beispielbohrung #619. (NS = Nutzschrift).

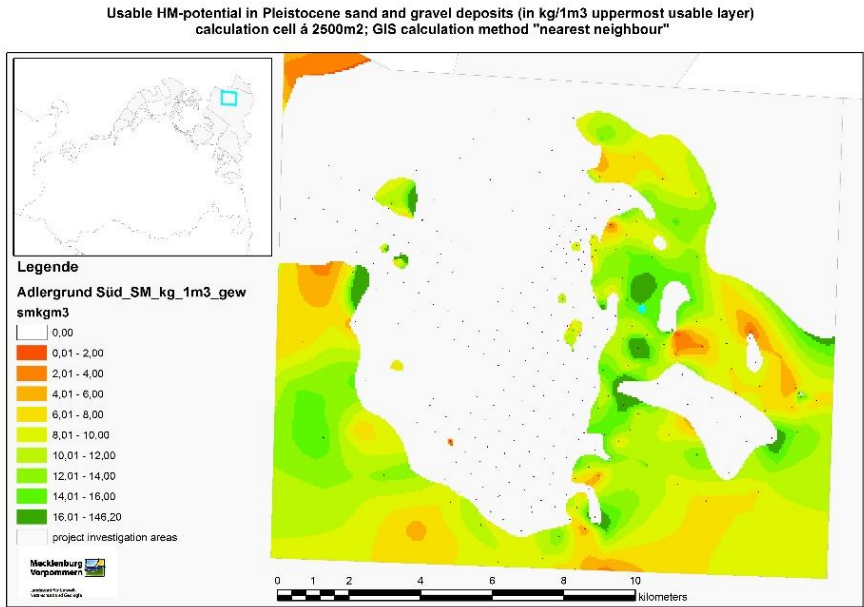


Abb. 4: Beispielhafte Darstellung des kalkulierten Schwermineralpotenzials für den obersten Meter im Aufsuchungsfeld Adlergrund Süd. Die etwas vergrößerte hellblaue Punktmarkierung zeigt die Lage der Beispielbohrung #619. (SM = Schwermineralanteile).

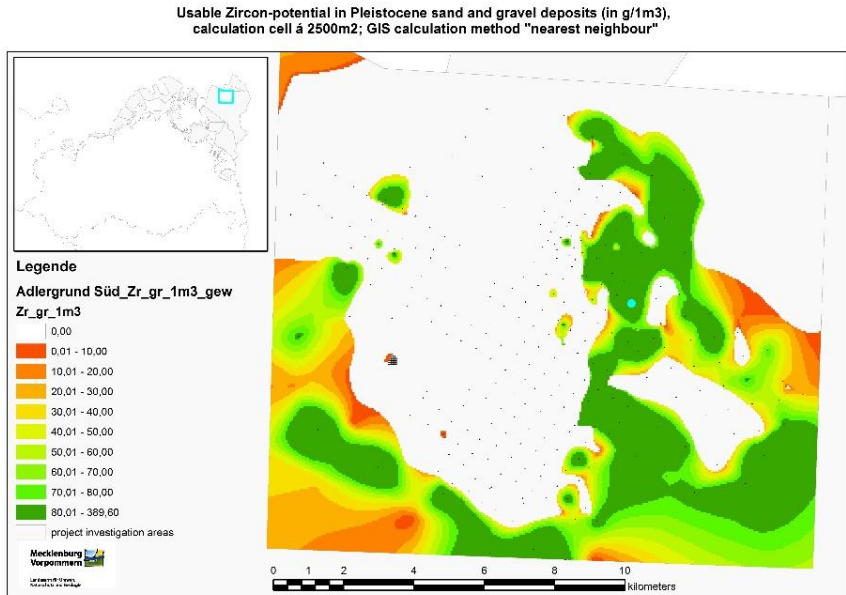


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung des kalkultierten Zirkonpotenzials für den obersten Meter im Aufsuchungsfeld Adlergrund Süd. Die etwas vergrößerte blaue Punktmarkierung zeigt die Lage der Beispielbohrung #619. (Zr_gr_m3_ = Zirkonanteile in g/m³).

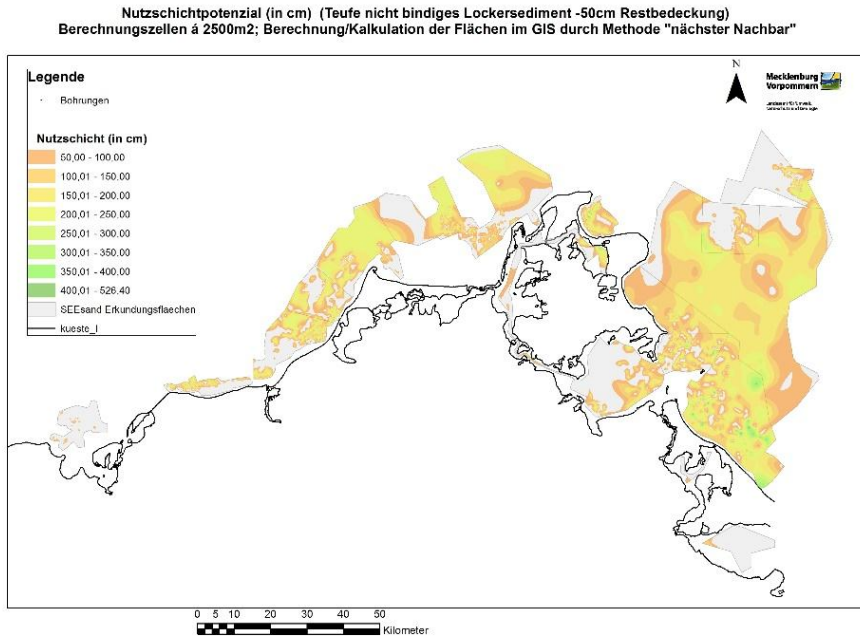


Abb. 6: Die berechnete Nutzschichtmächtigkeit von Sand- und Kiessandsedimenten abzüglich 50 cm Restbedeckung.

Ein Teilziel vom Verbundprojekt SEEsand beinhaltete die Einschätzung des Potentials an Zirkon und anderen Schwermineralen an der Ostseeküste Deutschlands. Im ersten Teil des Projektes erfolgte auf der Basis umfangreicher Recherchen von mehr als 20.000 Datensätzen eine Bewertung des Schwermineral-Potenzials mariner Sande und Kiessande. Für den Westteil der deutschen Ostsee wurde dabei ein Schwermineralpotenzial von 106.083 t inklusive 5.124 t Zirkon berechnet. Im Ostteil beträgt das geschätzte Schwermineralpotenzial 313.058 t inklusive 22.384 t Zirkon. Die Datenauswertungen zeigten, dass der SEE-führende Zirkon vor allem in der Korngrößenfraktion 0,063-0,1 mm (Feinsandfraktion) auftritt. Nach räumlicher Auswertung der Bohrdaten, basierend auf der Nutzschichtmächtigkeit nichtbindiger Sedimente (Sand und Kiessand) und des SMG, konnten Potenzialflächen im deutschen Ostseebereich ausgewiesen werden, die bei einer Sand- und Kiesandgewinnung für eine sekundäre Schwermineralextraktion in Frage

kommen könnten. Die verbleibende „gereinigte“ Quarzsandfraktion würde der üblichen Verwertung für den Küstenschutz oder als Baustoff zur Verfügung stehen.

In der Fläche ist das Abbaupotenzial der Schwerminerale innerhalb der Nutzsicht und innerhalb des obersten Meters im Sediment in den östlichen Teilen der Ostsee stärker angereichert. Hier sind vor allem die Bereiche um Adlergrund Süd und um Ostrügen zu nennen. Diese Anreicherung ist auch in östlicher Richtung weiter verfolgbar (vgl. Bublitz et al. 1972). Innerhalb der Schwermineralsande ist der maximale Zirkonanteil (Masseprozent) in der Fraktion 0,063-0,1 mm zu finden. Die Sedimente der östlichen Ostsee weisen gegenüber der westlichen Ostsee v.a. ein höheres Schwermineralpotenzial auf, weil dort die Flächenanteile mit erhöhten Nutzsichtmächtigkeiten größer sind (Abbildung 7). Die Bilanzierungen der SM-Gehalte und der Zirkon-Gehalte aller Bohrungen innerhalb der einzelnen Felder, d.h. anhand der Punktinformationen inklusive der Modellwerte, sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Das Feld Plantagenetgrund würde mit derzeitig kalkulierten 125.313 t die größte SM-Ausbeute bei einer 100-prozentigen großtechnischen Schwermineralaufbereitung liefern.

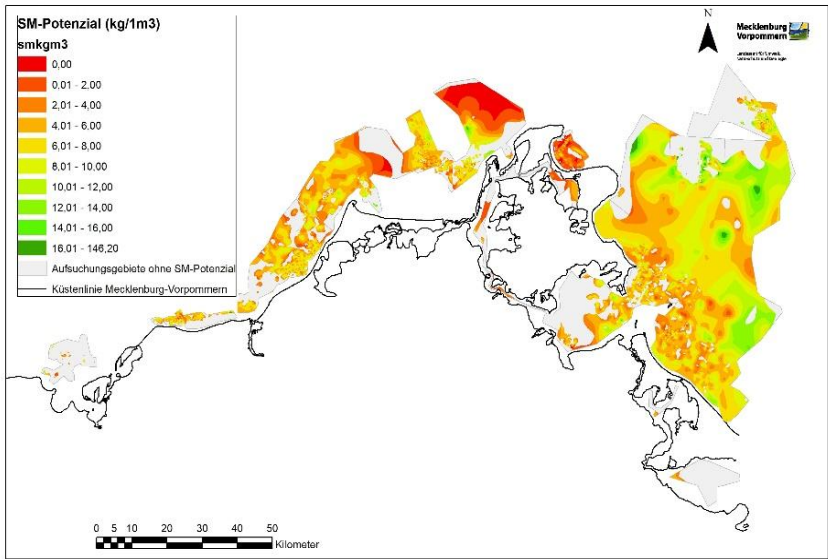


Abb. 7: Regionale Verteilung des statistisch berechneten Schwermineralpotenzials von marinen Sand- und Kiessandsedimenten im obersten anstehenden Kubikmeter Entnahmematerial in kg/m^3 , statistisch graphisch übertragen auf Feldgrößen von jeweils 2.500 m^2 .

Feld-Bezeichnung	SM-Gehalt [kg]	Zirkon-Gehalt [kg]
Landtief	29.896	2.753
Osttief	63.237	5.824
Ostrügen	39.883	3.673
Adlergrund Nord	76.402	7.037
Adlergrund Süd	13.599	1.253
Darßer Schwelle	2.267	169
Westlich Darß	36.015	2.690
Plantagenetgrund	125.313	9.361
Stoltera West	38.009	2.839
Greifswalder Bodden	1.152	106

Wismarbucht	2.528	189
Markgrafenheide	85.047	7.833
Boddengewässer	2.398	221
Tromper Wiek	15.874	1.462
Prorer Wiek	13.619	1.254
Gesamt	545.236	46.664

Tab. 4: Schwermineralpotenzial der Fraktion 0,063-1,0 mm bei einem kompletten Abbau der ermittelten Nuttschicht, abzüglich 50 cm Restsandbedeckung. SM= Schwermineral-Gehalt.

Die Exploration der oberflächennahen marinen Schwermineralvorkommen wird erschwert, weil die oberen 0,5 m des Meeresbodens durch natürliche Sedimentdynamik temporär umgelagert werden, zudem wirbelt die Grundschieppnetzfischerei die obersten 30 cm auf und auch die Sandextraktion durch Saugbagger verändert die Sedimentverteilung. Weiterhin konnten die nach der Erfassung 1985 bergbaulich abgebauten Sedimentmengen aus den oberen Profilabschnitten aufgrund fehlender Daten nicht bilanziert werden. Die hier vorgestellten SMG und Schwermineralpotenziale basieren auf Berechnungen mit klassischen Methoden wie der Schwermineral-Mikroskopie und der Schwererennung im Labormaßstab. Moderne chemische Analysen weisen dagegen Zirkoniumgehalte in Maßeinheiten in ppm (parts per million) aus. Die kalkulierten Mengenangaben von Schwermineralen und dem Wertmineral Zirkon werden als geschätzte Potenziale, bzw. nach UNFC-Klassifikation 2009 als „indicated resources“ bilanziert.

5 Weitere SEEsand-Ergebnisse und Ausblick

Die Anlandung und technische Aufbereitung des Rohhaufwerks am Strand von ohnehin für z.B. den Küstenschutz genutzten marinen Sanden wurde schon von den Geologen des ZGI begleitend zur marinen Kiessand-Gewinnung vorgeschlagen (vgl. Weinert/Stephan 1983). Vom östlichen Grenzbereich hin zum Polnischen Teil der Oderbank wurden in neueren Untersuchungen nur Oberflächenproben analysiert. Hier wurden Gebiete mit SMG von über 10 % (Masseprozent) kartiert (vgl. Mikulski et al. 2016). Die Bewertung der Abbauwürdigkeit der Ostseesedimente könnte sich in Zukunft ändern, wenn der Rohstoffbedarf

an Schwermineralen und den darin enthaltenen Seltenen-Erden-Elementen (SEE) zunimmt und der Bedarf nicht mehr ausreichend vom Weltmarkt gedeckt werden kann. Dieser Mehrbedarf erfordert eine verstärkte Rohstoffförderung von SEE (z.B. Yttrium, Dysprosium, Terbium, Ytterbium sowie Niob), welche im Zirkon enthalten sind.

Die Möglichkeit der Schwermineralseparation von Ostseesanden inklusive der Extraktion von SEE wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes SEEsand untersucht. Die Projektergebnisse zeigen, dass eine Abtrennung der Schwermineralfraktionen durch mechanische Behandlung mit kostengünstigen Technologien, z. B. Spiralseparatoren, möglich ist und dass diese in den Sandgewinnungsprozess integriert werden könnten (vgl. Martin et al. 2020). Anschließend könnte die Mischung der Schwerminerale durch eine Kombination aus Schwere-trennung und magnetischer Trennung separiert werden. Der Zirkon könnte durch elektrostatische Behandlung weiter gereinigt werden. Neben Zirkon waren Produkte der mechanischen Verarbeitung wertvolle Nebenprodukte wie Magnetit, Ilmenit und Rutil als Titanoxid-Resourcen sowie Granat zur Verwendung als Schleifmittel oder Strahlmittel (vgl. Ma/Elwert 2018).

Die technische Machbarkeit dieser kombinierten Technologie zur Gewinnung von Schwermineralen wurde in einem Pilotversuch an einer Großprobe von 200 t Sand demonstriert. Im SEEsand-Projekt wurde weiterhin die Machbarkeit einer Extraktion von SEE aus Schwermineralkonzentraten mittels chemischer Laugung oder Biolaugung (vgl. Hedrich et al. 2023) mit anschließender Biosorption von SEE (vgl. Breuker et al. 2020) durch verschiedene Mikroorganismen in sauren Lösungen in Laborversuchen gezeigt.

In den Ostseesanden liegen SEE in deutlich höherer Konzentration im Wertmineral Monazit als in anderen Schwermineralen vor. Eine Nutzung von Monazit als SEE-Wertmineral ist derzeit nicht planbar, da erhebliche Mengen Uran (bis 0,75 Masse-% Uranoxid) und Thorium (bis 21,9 Masse-% Thoriumoxid) im Kristallgitter eingebaut sein können (vgl. Elsner 2006, Liedtke et al. 2024). Damit würden bei der Aufbereitung von Monazit radioaktive Nebenprodukte abgetrennt werden, die entsorgt oder im optimalen Fall einer anderen Nutzung zugeführt werden müssen. Durch die Gewinnung und Aufbereitung von Monazit würde sich die Wertigkeit der gewinnbaren SEE aus den Schwermineralsanden annähernd verdoppeln. Monazit wurde kürzlich als wichtig für eine SEE-Gewinnung von der BGR neu bewertet (vgl. Liedtke et al. 2024).

Danksagung

Das Projekt SEEsand wurde im Rahmen der r4 Initiative als Bestandteil des Programms ‘Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland’ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (FKZ 033R163, Laufzeit: 2016-2019). Wir danken dem Helmholtz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und unseren Projektpartnern Technische Universität Clausthal, André Voß Erdbau und Transport GmbH, Imerys Fused Minerals Laufenburg GmbH und Geokompetenzzentrum Freiberg e.V. für die sehr gute fachliche Kooperation im Rahmen des Verbundprojektes. Die Autoren bedanken sich bei Dipl. Geol. André Kießling (GLU, Freiberg) für die unkomplizierte Bereitstellung digitaler Korngrößenanalysedaten und Dipl. Ing. André Steinhäuser (LUNG MV, Güstrow) für die praktische Hilfestellung bei der GIS-Bearbeitung.

Bibliographie

- Becker, S.; Bullmann, M.; Dietze, Hans-Joachim; Iske, Uwe (1986): „Massenspektrometrische Analyse ausgewählter chemischer Elemente bei der mikrobiellen Laugung von Zirkon“. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 324, 37-42.
- Berners, Lutz (2024): *Sustainability Standards in the Chinese Rare Earth Supply Chain. Final Report, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*. <https://doi.org/10.25928/0c8z-we31>.
- Breuker, Anja; Ritter, Simon F.; Schippers, Axel (2020): “Biosorption of rare earth elements by different microorganisms in acidic solutions”. *Metals*, 10, 954.
- Bublitz, Günther; Erbe, W; Neumann, Georg; Thomas, U. (1972): 1972: *Zusammenfassender Bericht zu den 1971/72 durchgeführten schwermineralführenden Seegrundgebieten der Oderbank auf dem Festlandssockel der DDR*. Teil 1 und Teil 2. Unpubl., Zentrales Geologisches Institut, Berlin, 87 S.; LUNG-Archiv: KGSM0030, KGSM0045, KGSM0059, KGSM0061.
- Elsner, Harald (2006): „Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden. Teil 12: Schwerminerale“. *Geologisches Jahrbuch*, Reihe H. 13, 143 S.

- Elsner, Harald (2010): *Heavy minerals of economic importance – assessment manual*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Heavy-Minerals-Economic-Importance.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Erdmann, Martin (2021): *Seltene Erden – Informationen zur Nachhaltigkeit*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/seltene_erden.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- Glombitza, Franz; Iske, Uwe; Bullmann, M; Dietrich, B. (1988): “Bacterial leaching of zirkon minerals for obtaining trace and rare earth elements”. Norris, P. R., Kelly, D. P. (eds.), *Biohydrometallurgy, Science and Technology Letters*, Kew Surrey U.K., 407-418.
- Hedrich, Sabrina; Breuker, Anja; Martin, Mirko; Schippers, Axel (2023): “Rare earth elements (bio)leaching from zircon and eudialyte concentrates”. *Hydrometallurgy*, 219, 106068.
- Hetzer, Hans (2006): „Ein vergessener Bergbau an der Ostseeküste der DDR“. *Nachrichtenblatt zur Geschichte der Geowissenschaften*, 16, 50-56.
- Kolp, Otto (1969): „Paläogeographische Ergebnisse der Kartierung des Meeresgrundes der westlichen Ostsee zwischen Fehmarn und Arkonä“. *Beiträge zur Meereskunde*, Heft 12-14, 19-59.
- Liedtke, Maren; Erdmann, Martin; Elsner, Harald; Gentzmann, Marie; Schüler-Zhou, Yun (2024): *Monazit aus Schwermineralsanden – Ein wichtiger Baustein in der Versorgung mit Seltenen Erden*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Commodity TopNews 72. 10.25928/qcix-ta73.
- Ma, Zhuo; Elwert, Tobias (2018): “Processing of heavy mineral bearing sands from the South-Western Baltic Sea coast for a potential rare earth element extraction”. *Proceedings of the European Mineral Processing & Recycling Congress EMPRC 2018, 25-26 June, Essen Germany*. Clausthal-Zellerfeld: GDMB Verlag., 163-177.
- Martin, Mirko; Schippers, Axel; Elwert, Tobias; Börner, Andreas; Grüßing, Ludger; Priese, Angelika; Reimer, Wolfgang (2020): *SEESand - Recovery of Heavy Rare Earth Elements from Heavy Minerals Sands. Final Report*. BMBF FKZ 033R163.

- <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT:1759106046/SEEsand-Gewinnung-schwerer-Seltenerdelemente-SEE?cHash=6e4143cb504127466b67a20d20a2eef4>.
- Mikulski, Stansilaw Z.; Kramarska, Regina; Zieliński, Grzegorz (2016): "Rare earth elements pilot studies of the baltic marine sands enriched in heavy minerals". *Mineral Resources Management*, 32, 5-28.
- Neumann, Georg; Bublitz, Günther (1969): „Seegrunduntersuchungen im westlichen Teil der Oder-Bucht“. *Beiträge zur Meereskunde*, 24-25, 82-109.
- Pfeiffer, Heinz (1965): *Die Schwermineral-Lagerstätten des Ostsee-Strandes zwischen Warnemünde und Ahlbeck und ihre wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten*. Dissertation Universität Rostock, 2 Bd., unveröffentlicht.
- Pfeiffer, Heinz (1972): „Schwermineralseifen, Küstendynamik und Sedi-menthaushalt sandiger Flachküsten Mecklenburgs“. *Jahrbuch für Geologie*, 4, 301-346.
- TGL 0-4188 (1965): *Technische Lieferbedingungen DDR-Standard Prüfsiebge-webe*. Berlin, 4 S.
- Weinert, Gisela/Stephan, Walther (1982): *Höflichkeitseinschätzungen Kies-sande Ostsee-Schelf II – Ergebnisbericht und geologisch-ökonomische Bewertung Markgrafenbeide – Darßer Schwelle – Darßer Ort/Kadetbank*. Unpubl., Zentrales Geologisches Institut, Außenstelle Reinkenhagen LUNG-Archiv: MGSE0170-5.
- Weinert, Gisela; Stephan, Walther (1983): *Höflichkeitseinschätzungen Kies-sande Ostseeschelf II Schwermineral-Potential Ostteil-Festlandsockel*. LUNG-Archiv: MGSE0051, 65 S.
- Weinert, Gisela; Stephan, Walther (1985): *Höflichkeitseinschätzungen Kies-sande Ostseeschelf III Schwermineral-Potential Westteil-Festlandsockel*. Unpubl., Zentrales Geologisches Institut, Außenstelle Reinkenhagen. LUNG-Archiv: MGSE0047, 84 S.
- UNFC (2009): *United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources*. United Nations Publication, ISSN 1014-7225, 25 p.

Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern in Süddeutschland – ein Beitrag zum Critical Raw Materials Act

Jochen Kolb

(Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Karlsruhe)

Abstract

The extraction of lithium from geothermal waters in southern Germany offers a promising opportunity to at least partially cover the increasing future demand for lithium for batteries in electromobility. Geothermal power plants, especially in the Upper Rhine Graben, could not only supply energy in the future, but also extract lithium if they are converted accordingly. The EU's Critical Raw Materials Act (CRMA) emphasises the strategic importance of lithium, as it is considered a critical raw material for the energy transition. Utilising geothermal water for lithium production could therefore not only increase security of supply in Europe, but also reduce dependence on imports from other countries. However, the simultaneous development of domestic battery production is essential. Lithium, a light alkali metal, is categorised as a critical raw material due to its high energy density and diverse industrial applications, particularly in lithium-ion batteries. Global resources amount to around 97 million tonnes of lithium metal, with the main deposits located in brine and hard rock deposits in countries such as Chile, Argentina, Australia, China and Bolivia. They are primarily extracted from brine deposits by evaporation or from hard rock deposits by conventional mining. Innovative processes such as direct lithium extraction (DLE) using sorp-

tion and ion exchange technologies are currently being intensively researched in order to extract lithium directly from geothermal water or from brines with greater efficiency and selectivity. In Germany, the Upper Rhine Valley with its hydrothermal brine sources and active geothermal power plants represents a significant potential lithium resource, whereby the complex chemistry of the brine as well as geological and technical challenges influence the extraction. In some regions of southern Germany, geothermal water contains high concentrations of lithium (150-200 mg/l), which can be extracted using various methods. Sorption or ion exchange has proven to be a promising method. At a laboratory and pilot scale, >90% of the lithium can be extracted in this way. The intermediate product must then be further processed into battery-grade material. The known deposits in the Upper Rhine Graben alone could cover just under 1% of global demand (2023). The potential, including in northern Germany, is much greater. The extraction of lithium from geothermal waters has several advantages: It is more environmentally friendly compared to traditional mining methods, as it does not require large areas of land and does not use energy for comminution. In addition, lithium production is directly combined with the generation of renewable energy, which can strengthen the ecological and economic sustainability of the entire process. Particularly in southern Germany, a region with numerous geothermal projects, this could be an efficient method of diversifying the supply of raw materials for battery technology in the future.

Resümee

Die Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern in Süddeutschland bietet eine vielversprechende Möglichkeit, den zukünftig steigenden Bedarf an Lithium für Batterien in der Elektromobilität zumindest zum Teil zu decken. Geothermiekraftwerke, insbesondere im Oberrheingraben, könnten in Zukunft nicht nur Energie liefern, sondern auch Lithium extrahieren, wenn sie entsprechend umgebaut werden. Im Rahmen des „Critical Raw Materials Act“ (CRMA) der EU wird die strategische Bedeutung von Lithium hervorgehoben, da es als kritischer Rohstoff für die Energiewende gilt. Die Nutzung von Geothermalwässern zur Lithiumproduktion könnte somit nicht nur die Versorgungssicherheit in Europa erhöhen, sondern auch die Abhängigkeit vom Import aus anderen Ländern reduzieren. Unerlässlich ist jedoch der gleichzeitige Aufbau der heimischen Batterieproduktion. Lithium, ein leichtes Alkalimetall, ist

aufgrund seiner hohen Energiedichte und vielfältigen industriellen Anwendungen, insbesondere in Lithium-Ionen-Batterien, als kritischer Rohstoff eingestuft. Die weltweiten Ressourcen belaufen sich auf etwa 97 Mio. Tonnen Lithiummetall, wobei die Hauptvorkommen in Sole- und Hartgesteinslagerstätten in Ländern wie Chile, Argentinien, Australien, China und Bolivien liegen. Die Gewinnung erfolgt primär durch Gewinnung in Solenvorkommen mittels Verdunstung oder in Gesteinslagerstätten durch konventionellen Bergbau. Innovative Verfahren wie die direkte Lithiumextraktion (DLE) mittels Sorptions- und Ionenaustauschtechnologien werden derzeit intensiv erforscht, um Lithium direkt aus Geothermalwasser oder mit höherer Effizienz und Selektivität aus Solen zu gewinnen. In Deutschland stellt das Oberrheintal mit seinen hydrothermalen Solequellen und aktiven Geothermiekraftwerken eine bedeutende potenzielle Lithiumressource dar, wobei die komplexe Chemie der Sole sowie geologische und technische Herausforderungen die Gewinnung beeinflussen. Das Geothermalwasser enthält in einigen Regionen Süddeutschlands hohe Konzentrationen an Lithium (150-200 mg/l), das durch verschiedene Verfahren gewonnen werden kann. Als vielversprechende Methode hat sich die Sorption bzw. der Ionenaustausch herausgestellt. Im Labor- und Pilotmaßstab können so >90% des Lithiums gewonnen werden. Das Zwischenprodukt muss dann zu batteriefähigem Material weiterverarbeitet werden. Schon die bekannten Vorkommen im Oberrheingraben könnten knapp 1% der globalen Nachfrage (2023) decken. Das Potenzial, auch in Norddeutschland, ist wesentlich größer. Die Gewinnung von Lithium aus Geothermalwässern hat mehrere Vorteile: Sie ist umweltfreundlicher im Vergleich zu traditionellen Bergbaumethoden, da sie keine großen Flächen beansprucht und keine Energie für die Zerkleinerung von Gesteinen verwendet. Zudem wird die Lithiumproduktion direkt mit der Gewinnung von erneuerbarer Energie kombiniert, was die ökologische wie ökonomische Nachhaltigkeit des gesamten Prozesses stärken kann. Besonders in Süddeutschland, einer Region mit zahlreichen Geothermieprojekten, könnte dies eine effiziente Methode darstellen, die Rohstoffversorgung für die Batterietechnologie zukünftig zu diversifizieren.

Keywords/Schlüsselwörter

Lithium, Critical Raw Materials Act, Geothermal, Hydrothermal fluid;
Lithium, Critical Raw Materials Act, Geothermie, Hydrothermales Fluid

1 Einleitung

Lithium (Li) gehört zu den Alkalimetallen und ist das leichteste Metall, das wir kennen. Seit 2020 wird es von der Europäischen Union als kritischer Rohstoff eingestuft (vgl. *Europäische Kommission* 2020). Lithium wird in Lithium-Ionen-Batterien (LIB), in Keramik und Glas, Schmierfett, Flussmitteln und Polymeren, in der Luftaufbereitung und in der Medizin verwendet (vgl. Perez 2023, *US Geological Survey* 2023). Aufgrund seiner hohen Energiedichte wird es zunehmend zur Energiespeicherung in LIBs verwendet. Während im Jahr 2015 nur 37 % des weltweiten Lithium-Angebots in LIBs verwendet wurde, stieg der Anteil schrittweise auf 80 % im Jahr 2022 (vgl. *US Geological Survey* 2020, 2023). Modelle prognostizieren eine globale Lithium-Nachfrage von 316,3 - 558,8 Tausend Tonnen pro Jahr im Jahr 2030, ein Anstieg des Lithium-Bedarfs um 430 bis 760 % im Vergleich zu 2020 (vgl. Schmidt 2023).

Da Lithium sehr reaktiv ist, kann es nur in chemischen Verbindungen transportiert und gehandelt werden. Lithiumcarbonat (Li_2CO_3) ist zurzeit das meist gehandelte Produkt. Daher werden Ressourcen, Reserven und Produktionszahlen international in „Lithium Carbonate Equivalent (LCE)“ angegeben. Es werden Batterie- und Industrie- bzw. technische Qualität gehandelt, d. h. mit einem Reinheitsgrad von mehr als 99,5 % bzw. 99-99,5 % (Schmidt, 2023). Die Alternative ist Lithiumhydroxid-Monohydrat ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) in einer Reinheit von 56,5 - 57,5% (Schmidt, 2023), das von Kathodenherstellern inzwischen bevorzugt wird (vgl. Dahlkamp et al. 2023, Liebetreu 2022).

In den 1990er Jahren war der Lithium-Preis aufgrund des stabilen Angebots und der geringen Nachfrage mit 4.200 - 4.500 US\$ pro Tonne Lithiumcarbonat in Batteriequalität stabil niedrig (*US Geological Survey*, 1996, 2000). In den 2000er Jahren führten das zunehmende Lithium-Angebot, Wirtschaftskrisen und die steigende Lithium-Nachfrage in der Elektronik zu Preisschwankungen (vgl. *Bowell et al.* 2020). Auf die steigende Nachfrage folgte ein Anstieg der weltweiten Lithium-Produktion. Die COVID-19-Krise führte jedoch zu einem erheblichen Nachfragerückgang und das daraus resultierende Überangebot an Lithium senkte den Preis signifikant (vgl. *US Geological Survey* 2021). Infolgedessen ging die Bergwerksproduktion zurück, was zu einem Versorgungsengpass nach der Pandemie führte. Die Lithium-Preise stiegen auf ein Maximum von 70.000 US\$/t für batterietaugliches Lithiumcarbonat (vgl. *Australian*

Government 2023). Die zuletzt wieder steigende Produktion, die Bedenken einer Überproduktion und die geringer als erwartet ausgefallene Nachfrage senkten den Preis wieder auf ca. 9.400 US\$/t für batterietaugliches Lithiumcarbonat (vgl. *US Geological Survey* 2025).

Lithiumlagerstätten lassen sich in Hartgesteinsvorkommen und Solevorkommen unterteilen (vgl. *Bowell et al.* 2020). Beide umfassen bedeutende Ressourcen und Reserven. Die globalen Lithium-Ressourcen belaufen sich auf 115 Mio. t Lithium-Metall und 30 Mio. t Lithium-Metall-Reserven (vgl. *US Geological Survey* 2025). Die wichtigsten Bergbauländer sind Chile, Argentinien, Australien und China (vgl. *US Geological Survey* 2025). Chile und Argentinien haben 9,3 Mio. t bzw. 4 Mio. t Lithium-Metallreserven in Solen, während die australischen Lithium-Reserven von 7 Mio. t Lithium-Metall in Hartgesteinslagerstätten zu finden sind (vgl. *US Geological Survey* 2025).

Die größten Lithium-Ressourcen befinden sich mit 23 Mio. Tonnen Lithium-Metall in Solen in Bolivien und Argentinien (vgl. *US Geological Survey* 2025). Trotzdem wird Lithium aufgrund von Landnutzungskonflikten und aus politischen Gründen, z. B. dem Staatseigentum der natürlichen Ressourcen, in Bolivien nicht abgebaut (vgl. *Barandiarán* 2019). Im Jahr 2025 hat Deutschland seine geschätzten Lithium-Ressourcen auf 5 Mio. Tonnen Lithium-Metall erhöht, die in Hartgestein und geothermischen Solelagerstätten vorkommen und die siebtgrößte Ressource weltweit darstellen (vgl. *US Geological Survey* 2025).

Beispiele für Lagerstätten sind Greenbushes in Australien, der Kings Mountain Belt in den USA und Zinnwald in Deutschland (vgl. *Ambrose und Kendall* 2020, *Bowell et al.* 2020). Die Wirtsgesteine sind hauptsächlich Pegmatit, Greisen und alkalischer Granit sowie Tongesteine (vgl. *Bowell et al.* 2020, *Gourcerol et al.* 2019). Die wichtigsten Lithium-Mineralen sind Spodumen ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), Petalit ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$), Lepidolith ($\text{K}[\text{Li},\text{Al}]_3[\text{Al},\text{Si}]_4\text{O}_{10}[\text{OH},\text{F}]_2$), Zinnwaldit ($\text{K}[\text{Li},\text{Al},\text{Fe}]_3[\text{Al},\text{Si}]_4\text{O}_{10}[\text{OH},\text{F}]_2$), Jadarit ($\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7[\text{OH}]$) und Hectorit ($\text{Na}_{0,3}[\text{Mg},\text{Li}]_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{F},\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (vgl. *Bowell et al.* 2020). Diese Minerale enthalten in der Regel 1,0 - 9,7 Gew.% Li_2O . Das Lithium-Erz wird durch Brechen, Mahlen, Sieben, Dichte- und Magnetabscheidung sowie Flotation abgetrennt und konzentriert (vgl. *Banks* 1953, *Peera-wattuk und Bobicki* 2018). Die Konzentrate werden auf unterschiedliche Art und Weise hydro- und pyrometallurgisch zum Endprodukt weiterverarbeitet.

Zu den Solevorkommen zählen Salare, Ölfeldsolen und geothermische Solen (vgl. *Bowell et al. 2020*, *Murodjon et al. 2020*). Kommerziell abgebaute Salare sind der Salar de Atacama in Chile (SQM und Albemarle) und der Salar del Hombre Muerto in Argentinien (Livent) (vgl. *Schmidt 2023*). Die Solen haben in der Regel einen hohen Salzgehalt mit einem Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen (TDS) von 100 - 330 g/L und einer Lithium-Konzentration vor allem in LiCl von 10 mg/L - 1,84 g/L (vgl. *An et al. 2012*, *Bowell et al. 2020*, *Reich et al. 2023a*). Zur Lithium-Gewinnung wird die Sole in Verdunstungsteiche gepumpt, in denen weniger lösliche, unerwünschte Salze ausgefällt werden (vgl. *An et al. 2012*, *Meshram et al. 2014*, *Peerawattuk und Bobicki 2018*, *Tran und Luong 2015*, *Ventura et al. 2016*). Durch weitere Verdunstung wird ein Lithium-Gehalt von ~ 6 % erreicht (vgl. *Chordia et al. 2022*, *Peerawattuk und Bobicki 2018*). Lithiumcarbonat wird dann durch die Zugabe von Soda hergestellt (vgl. *Agusdinata et al. 2018*, *Vera et al. 2023*).

2 Geothermie

Die Geothermie dient in der Regel zur Wärme- und Stromerzeugung und nutzt dazu entweder Wärme, die durch Gesteine direkt abgegeben wird oder heiße Wässer, die hydrothermalen Fluide. Da es in Deutschland keinen aktiven Vulkanismus gibt, sind wir auf hydrothermale Fluide aus tiefliegenden Gesteinseinheiten angewiesen. Geothermale Fluide in Deutschland werden im Ruhrgebiet, im Molassebecken, im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben, z.B. in Bruchsal, Landau, Insheim, gefördert (Abbildung 1).

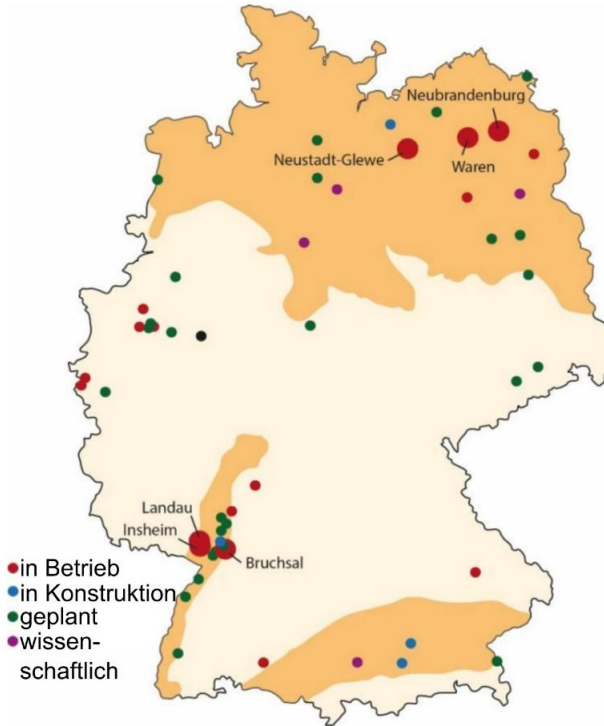


Abb. 1: Überblick über die Verteilung von Geothermieprojekten in unterschiedlichen Stadien in Deutschland. In Süddeutschland beschränken sich die Projekte auf den Oberrhein und die Molasse im Alpenvorland (*Bundesverband Geothermie* 2021).

Die Geologie der geothermischen Reservoirs des Oberrheintals wird durch Gneis aus dem Karbon, Granit und Sandstein aus dem Perm und der Trias dominiert (Abbildung 2; vgl. Regenspurg et al. 2016, Sanjuan et al. 2016).

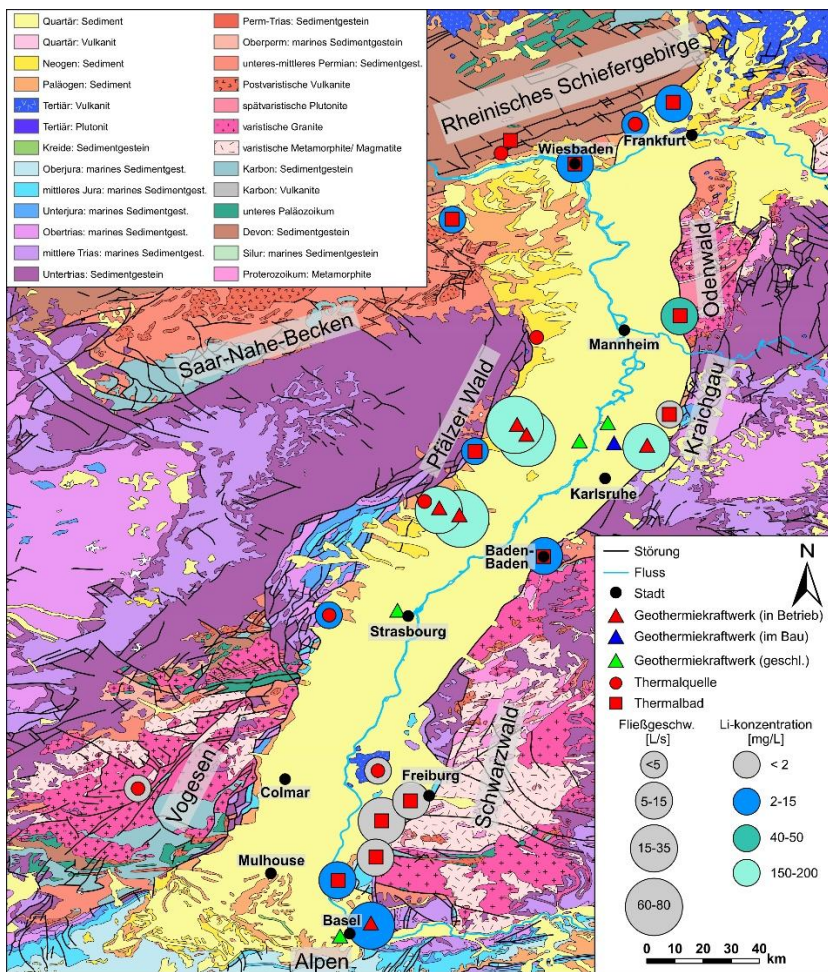


Abb. 2: Geologische Karte des Oberrheingrabens von Basel im Süden bis Frankfurt im Norden (nach: Voges et al. 2006). Känozoische und kretazische Vulkanite nach Binder et al. (2022). Daten zu Quellen und Geothermiekraftwerken aus Internetrecherche. Lithiumkonzentrationen aus Sanjuan et al. (2016) und eigenen, unveröffentlichten Daten.

Die Geothermalwässer im Oberrheintal haben einen Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen (TDS) von 106 - 125 g/L und einen nahezu neutralen bis sauren pH-Wert (vgl. Sanjuan et al. 2016, Stober et al. 2014). Die

Hauptbestandteile sind Natrium, Kalium, Kalzium, Magnesium, Silizium, Chlorid und Sulfat. Die Spurenelemente werden von Brom, Bor, Strontium, Barium, Mangan, Eisen, Arsen, Rubidium, Cäsium, Zink und Blei dominiert. Die Lithiumkonzentration beträgt 160 - 180 mg/L (vgl. Sanjuan et al. 2016). Der Gasgehalt kann lokal hoch sein, wobei das Gas/Flüssigkeits-Verhältnis zwischen 0,1 - 2,3 liegt (vgl. Sanjuan et al. 2016, Stober et al. 2014). Im Oberrheintal ist die dominante Gasphase CO₂, mit geringen Anteilen von N₂ und CH₄ und Spuren von He, O₂, H₂ und Ar (vgl. Sanjuan et al. 2016). Aufgrund der komplexen Chemie von Geothermalwasser ist die Ausfällung von Mineralen wie Kalzit, Gips, amorphem Siliziumoxid oder Baryt, die als Scaling bezeichnet wird, eine große Herausforderung. Scaling kann im Reservoir, in den Bohrlöchern oder in den Wärmetauschern auftreten (vgl. Stober und Bucher 2020).

Die Wirtschaftlichkeit eines Geothermieprojektes hängt von der nutzbaren Temperaturdifferenz, der erreichbaren Fließgeschwindigkeit und der Wärmekapazität der jeweiligen Sole ab. Die wichtigsten Merkmale für ein wirtschaftlich vielversprechendes Reservoir sind: Wärmequelle, Durchlässigkeit des Gesteins, Wasserressource, Abdichtung des Reservoirs nach oben durch impermeable Gesteine, Nachfluss heißer Sole in das Reservoir (vgl. DiPippo 2012). Die geothermische Energie kann je nach Beschaffenheit der Lagerstätte für Fernwärme oder Stromerzeugung genutzt werden (vgl. Acksel et al. 2021). Es sind mindestens zwei Bohrungen erforderlich, um die heiße Sole an die Oberfläche zu pumpen und nach der Nutzung zu reinjizieren. Je nach Temperatur, ist das Fluid wasser- oder dampfbasiert (vgl. Stober und Bucher 2020). Die Umwandlung von Wärme in Strom bei einer Quelltemperatur zwischen 100-180°C wie sie für den Oberrhein typisch ist, ist nur mit Arbeitsmedien möglich (z.B. Ammoniak-Wasser-Gemisch). Je nach Medium und Temperatur liegt der Wirkungsgrad solcher Anlagen zwischen 10-15 % (vgl. Stober und Bucher 2020). Für die direkte Nutzung für Fernwärme wird die Wärmeenergie durch einen Wärmetauscher für den Fernwärmewasserkreislaufs umgewandelt. Es ist angedacht, in solchen Anlagen das Lithium neben der Wärme- oder Stromproduktion mitzugewinnen. Folgende technische Parameter sind daher für die Lithiumgewinnung zu beachten: eine Temperatur zwischen 130°C und 60°C, ein Druck von bis zu 35 bar, Fließraten von 30-90 L/s, eine komplexe Zusammensetzung

mit hohen Gehalten an gelösten Bestandteilen, evtl. hohe Gasgehalte und $\text{pH} \approx 4 - 5$.

3 **Aufbereitung: Direkte Lithiumextraktion**

Die direkte Lithiumextraktion (DLE) kann über verschiedene Techniken erfolgen: direkte Fällung, Lösungsmittlextraktion, elektrochemische Extraktion, Elektrodialyse, membranbasierte Technologien und Sorption (vgl. Choubey et al. 2017, Meng et al. 2021, Stringfellow und Dobson 2021, Swain 2017). Alle Techniken zielen auf die selektive Gewinnung von Lithium aus der komplex zusammengesetzten Sole auf minimalinvasive Weise ab. Derzeit wird die direkte Lithiumextraktion intensiv wissenschaftlich untersucht und einige Techniken wie elektrochemische Extraktion, Elektrodialyse und Sorption werden bereits in Pilotanlagen getestet (vgl. Joo et al. 2020, Melnikov et al. 2017, Warren 2021).

Im Vergleich zu allen anderen hier aufgeführten Extraktionstechniken sind Sorption und Ionenaustausch im Allgemeinen nicht auf eine bestimmte Solezusammensetzung beschränkt und die verschiedenen Arten von Sorptionsmitteln ermöglichen die globale Anwendbarkeit einer universellen Technik für Fluide, die sich in Zusammensetzung, Temperatur, Druck und Durchflussmenge unterscheiden (vgl. Reich et al. 2023b).

Bei der direkten Lithiumextraktion mittels Sorption und Ionenaustausch werden die Sorptionsmittel mit der Lithium-haltigen Sole vermischt (vgl. Chitrakar et al. 2012). Nach der Abtrennung wird die an Lithium verarmte Sole in ihr Reservoir zurückgeführt und Lithium wird mit einer speziellen Desorptionslösung aus dem Sorptionsmittel zurückgewonnen (vgl. Chitrakar et al. 2012, Kölbel et al. 2023). Aus der Lösung kann dann das Zwischenprodukt, Lithiumkarbonat oder Lithiumhydroxid, ausgefällt werden (vgl. Kölbel et al. 2023).

Lithium-Aluminium-Hydroxid, Lithium-Titan-Oxid, Zeolith, Lithium-Eisen-Phosphat und Lithium-Mangan-Oxid sind die am besten untersuchten Sorptionsmittel für die direkte Lithiumextraktion (vgl. Kölbel et al. 2023, Orooji et al. 2022, Reich et al. 2023a,b, 2024, Safari et al. 2020). Diese umfassen mehrere verschiedene Minerale mit unterschiedlichen Eigenschaften, z. B. in Bezug auf die maximale Beladung, Selektivität, Stabilität und Sorptionskinetik (vgl. Bajestani et al. 2019, Isupov et al. 1999, Orooji et al. 2022, Reich et al. 2023a,b, 2024, Safari et al. 2020).

Bei allen diesen A Sorptionsmitteln ist der Prozess der Lithiumeinlagerung und folglich die Veränderung der Hydrochemie der Flüssigkeit ein wichtiges Thema, das sorgfältig berücksichtigt werden muss. Redoxempfindliche Sorbentien haben oft eine begrenzte chemische Stabilität, da die Redoxreaktionen bei jedem Sorptions-/Desorptionszyklus zu Veränderungen der Kristallgitterparameter führen. Dies ist insbesondere bei Lithium-Eisen-Phosphat und Lithium-Mangan-Oxid der Fall (vgl. Gao et al. 2018, Hunter 1981, Intaranont et al. 2014, Kuss et al. 2014, Reich et al. 2023a, 2024). Handelt es sich bei dem zugrundeliegenden Sorptionsprozess um einen Ionenaustausch, werden Protonen oder Alkalimetalle in die Sole freigesetzt, wodurch sich der pH-Wert ändert (und eine pH-Pufferung erforderlich wird) oder die Chemie des Fluids verändert. Um die Leistung von Sorptionsmitteln zu verbessern, können sie entweder synthetisiert werden, um reine chemische Zusammensetzungen mit kontrollierter Kristallstruktur zu erreichen, oder mit anderen Sorptionsmitteln kombiniert werden.

4 Sorption zur direkten Lithiumextraktion

Synthetischer Zeolith 13X, Lithium-Eisen-Phosphat und Lithium-Mangan-Oxid sind neuartige Li-Sorbentien, die in Laborexperimenten mit synthetischen LiCl-Lösungen und geothermischen Solen auf ihre Anwendbarkeit für DLE untersucht wurden (vgl. Reich et al. 2023b, 2024, Slunitschek et al. 2025). Die Sorptionskinetik in Experimenten mit synthetischem Zeolith 13X ist extrem schnell und erreicht das Gleichgewicht innerhalb einer Minute (vgl. Reich et al. 2023b). Ähnlich schnell ist die Sorption von Lithium an Lithium-Mangan-Oxid, bei dem nach einer Minute 56% der Sorptionskapazität erreicht werden, ein Gleichgewicht stellt sich allerdings erst nach 12 Stunden ein (vgl. Slunitschek et al. 2025). Im Vergleich ist die mit Lithium-Eisen-Phosphat benötigte Reaktionszeit wesentlich länger und hängt stark von der Prozess Temperatur ab. Obwohl sich eine Erhöhung der Temperatur positiv auf die Sorptionskinetik von Lithium-Eisen-Phosphat auswirkt, benötigt der Prozess drei Stunden für die maximale Lithium-Extraktion, d. h. immer noch viel länger als Zeolith 13X. Die maximale Sorptionskapazität ist mit 20,3 für Zeolith 13X, 43 mg/g für Lithium-Eisen-Phosphat und 31 mg/g für Lithium-Mangan-Oxid recht hoch (vgl. Reich et al. 2023b, 2024, Slunitschek et al. 2025).

Die begrenzte Lithium-Selektivität von Zeolith 13X ist ein entscheidender Parameter, der es für die direkte Lithiumextraktion aus geothermischen Solen ungeeignet macht. Solange Zeolith nicht in Richtung einer höheren Lithiumselektivität modifiziert werden kann, ist seine Anwendung auf Fluide beschränkt, die nur geringe Gehalte an konkurrierenden Ionen wie Kalzium, Kalium, Strontium, Barium, Mangan und Arsen enthalten (vgl. Reich et al. 2023b). Lithium-Eisen-Phosphat hingegen hat eine sehr hohe Selektivität für Lithium und ist daher vielseitiger einsetzbar (vgl. Reich et al. 2024). Die Sorptionsselektivität für Lithium-Mangan-Oxid folgt der Reihenfolge $Mn > Zn > As > Ba > Li > Sr > Ca > K, Mg > Na$ (vgl. Slunitschek et al. 2025).

Synthetischer Zeolith 13X und Lithium-Eisen-Phosphat sind neuartige Sorptionsmittel, die mit bereits untersuchten Sorptionsmitteln wie Lithium-Mangan-Oxid, Lithium-Titan-Oxid und Lithium-Aluminium-Hydroxid konkurrenzfähig sind. Sie sind beide auf dem Markt erhältlich und erfordern keine komplexe, teure oder zeitaufwändige Synthese, die erst noch im industriellen Maßstab etabliert werden muss (vgl. Reich et al. 2023a, Xiao et al. 2015, Zhang et al. 2010). Die Anwendbarkeit der einzelnen Sorptionsmittel für DLE aus geothermischen Solen kann kritischer Parameter, der Lithium-Selektivität, der maximalen Lithium-Sorptionskapazität, der optimalen Temperatur, der Stabilität des Sorptionsmittels, des optimalen pH-Werts und der Äquilibrierungszeit bewertet werden (Abbildung 3, Tabelle 1; vgl. Reich 2024). Der direkte Vergleich ist jedoch schwierig, da die Experimente mit verschiedenen Sorptionsmitteln in unterschiedlichen Versuchsaufbauten und mit verschiedenen Flüssigkeiten durchgeführt wurden. Für Sorptionsmittel, die auf einem Lithium-Proton-Austausch basieren, werden die Experimente häufig in synthetischen LiOH-Lösungen bei alkalischem pH-Wert durchgeführt, da dann die Sorptionsleistung besonders hoch ist. Jedoch sind natürliche Solen in der Regel NaCl-dominiert und haben einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert (vgl. Reich 2024). Die Verwendung von LiCl-Lösungen ist daher für DLE-Experimente besser geeignet. Außerdem werden Sorptionsexperimente mit unterschiedlichen Lithium-Ausgangskonzentrationen durchgeführt. Höhere Lithium-Ausgangskonzentrationen erhöhen in der Regel auch die Lithium-Sorptionskapazität (vgl. z.B. Tian et al. 2010). Experimente mit natürlichen Solen sind zumindest im Hinblick auf Selektivitätsschätzungen aufgrund variabler Ausgangskonzentrationen konkurrierender Ionen kaum vergleichbar

(vgl. Intaranont et al. 2014, Reich et al. 2023b, 2024). Daher fasst man Höchst- oder Mindestwerte für jeden Parameter mit verschiedenen Sorptionsmitteln zusammen, um die Stärken und Schwächen der Sorptionsmittel zu veranschaulichen (Abbildung 3). Eine hohe Lithium-Selektivität, eine hohe maximale Lithium-Sorptionskapazität, die Stabilität des Sorptionsmittels und eine kurze Äquilibrierungszeit sind von Vorteil (vgl. Reich 2024). Eine hohe Lithium-Selektivität ist erforderlich, um Lithium von konkurrierenden Ionen zu separieren. Eine hohe maximale Sorptionskapazität ist vorteilhaft, da weniger Sorptionsmittel benötigt wird, um Lithium effizient zu extrahieren. Eine hohe chemische Stabilität erhöht die Anzahl der Sorptions-Desorptions-Zyklen, in denen das Sorptionsmittel wiederverwendet werden kann, und verringert die Kontamination der Sole durch Elemente, die aus dem Sorptionsmittel eluiert werden. Eine schnelle Sorptionskinetik ist bei der Extraktion aus geothermischen Solen besonders wichtig, da die langfristige Lagerung von Solen an der Oberfläche das Risiko von Ablagerungen birgt und hohe Durchflussraten schnell große Fluidvolumina verursachen (vgl. Reich 2024). Eine Temperatur zwischen 60 und 80 °C entspricht der Temperatur in der Reinjektionsleitung von Geothermiekraftwerken, und ein pH-Wert nahe dem natürlichen Sole-pH-Wert von 5 bis 6 ist günstig für den Betrieb. Die Entscheidung für ein Sorptionsmittel ist sehr wichtig und kann nur für die spezifische Flüssigkeitszusammensetzung und die örtlichen Bedingungen getroffen werden. Darüber hinaus können die Auslegung der Extraktionsanlage sowie wirtschaftliche Parameter dazu führen, dass ein Sorptionsmittel mit einer geringeren Sorptionskapazität besser geeignet ist als ein Sorptionsmittel, das eine hohe Sorptionskapazität aufweist, aber starke Säuren zur Desorption benötigt (vgl. Hawash et al. 2010) oder sehr lange Reaktionszeiten (vgl. Shi et al. 2013), wenn nur eine geringe Menge an Sole in der gleichen Zeit verarbeitet werden kann. Zeolith 13X und Lithium-Eisen-Phosphat weisen beide eine sehr schnelle Kinetik auf, was für den industriellen Prozess günstig ist. Die maximale Lithium-sorptionskapazität im Gleichgewicht erreicht $\sim 50 - 123 \text{ mg/g}$ (vgl. Reich et al. 2023b). Die angegebenen maximalen Sorptionskapazitäten wurden in Experimenten unter optimalen pH- und Temperaturbedingungen erzielt, die nicht unbedingt mit den Umgebungsbedingungen für geothermische Kraftwerke übereinstimmen (vgl. Reich et al. 2023b). Daher ist die Sorptionskapazität bei der Entscheidung für ein Sorptionsmittel nicht so entscheidend wie die Lithiumselektivität und Kinetik.

Para- meter	Lithium- sorp- tionska- pazität	Optimale Tempe- ratur	Stabili- tät des Sorbens	Optima- ler pH- Wert	Gleich- gewicht erreicht nach	Selektivi- tät
Einheit	mg/g	°C	-	-	h	-
LMO	53,5	70	schlecht	alkalisch	24	gut
LTO	94,5	60	sehr gut	alkalisch	10 – 192	gut
LADH	13,4	90	mittel- mäßig	3 – 8	1	gut
Al(OH) 3	123	vernach- lässigbar	schlecht	alkalisch	24	gut
Zeolith 13X	20,3	vernach- lässigbar	mittel- mäßig	8 – 9	0,02	schlecht
LFP	43	60	gut	5 – 7	3 – 4	sehr gut
Maß (Abb. 3)	0 –140	0 – 100	schlecht – sehr gut	alkalisch - sauer	210 – 0	niedrig – hoch

Tab. 1: Parameter für die Abschätzung der Eignung des Sorptionsmittels für geothermische Solen in Abb. 3 (vgl. Reich 2024). Referenzen siehe Abb. 3.

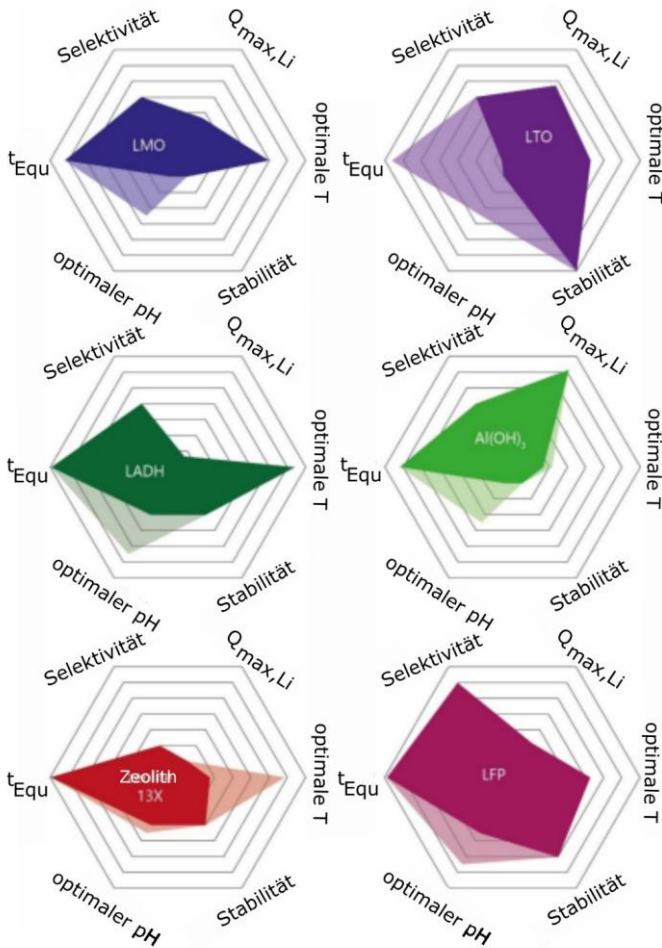


Abb. 3: Vergleich verschiedener Sorptionsmittel hinsichtlich Lithium-Selektivität, maximaler Lithium-Sorptionskapazität ($Q_{\max, \text{Li}}$), optimaler Temperatur (T), Stabilität des Sorptionsmittels, optimalem pH-Wert und erforderlicher Äquilibrierungszeit (t_{Equ}) (vgl. Reich 2024). Die zugrunde liegenden Daten sind in Tab. 1 aufgeführt. Größere Felder weisen auf ein höheres Anwendungspotenzial für die direkte Lithiumextraktion aus Geothermalwasser hin. Transparente Felder veranschaulichen die Variabilität eines Parameters. Daten für Lithiummanganoxid (LMO), Lithiumtitanoxid (LTO), geschichtetes Aluminiumdoppelhydroxid (LADH) und amorphe/polymere $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Sorbentien: Bajestani et al. (2019), Choubey et al. (2017), Han et al. (2012), Hawash et al. (2010),

Heidari und Momeni (2017), Herrmann et al. (2022), Isupov et al. (1999), Lawagon et al. (2016), Orooji et al. (2022), Paranthaman et al. (2017), Prodromou (2016), Qian et al. (2019), Seip et al. (2021), Shi et al. (2013), Zhang et al. (2023), Zhang et al. (2010). Daten für Zeolith 13X und Lithiumeisenphosphat (LFP): Reich et al. (2023b, 2024).

5 Lithiumressourcen in Süddeutschland

Das Oberrheintal erstreckt sich von Basel an der deutsch-schweizerischen Grenze im Süden entlang der deutsch-französischen Grenze bis nach Frankfurt im Norden über mehr als 300 km (Abbildung 2). Es liegt im Oberrheingraben, der Teil des europäischen känozoischen Grabensystems ist, das sich von der Rhône-Mündung bis zur Nordsee erstreckt. Der Oberrheingraben wird von einer maximal 6500 m mächtigen Säule aus permo-triassischen bis holozänen Sedimentgesteinen (Abbildung 2; vgl. Geyer et al. 2011, Voges et al. 2006). Am Rande des Oberrheingrabens befinden sich mehrere Kurorte wie Wiesbaden oder Baden-Baden (Abbildung 2). Zahlreiche römische Überreste deuten darauf hin, dass die warmen Quellen mindestens seit dieser Zeit intensiv genutzt wurden (vgl. Becker und Reischmann 2021, Geyer et al. 2011, He et al. 1999). Darüber hinaus wurden an mehreren Standorten Salzsolon zur Salzgewinnung genutzt, z.B. in Bruchsal und Bad Nauheim (vgl. Becker und Reischmann 2021, Geyer et al. 2011). Das erste kommerzielle Geothermiekraftwerk wurde 2007 in Landau eröffnet (vgl. Agemar et al. 2014, Stober und Bucher 2015). Die triassischen Sandsteine und die variszischen Kristallingesteine in >2000 m Teufe haben das größte Potenzial für die geothermische Energiegewinnung (vgl. Agemar et al. 2014, Sanjuan et al. 2016, 2022). Die geothermischen Fluide im Oberrheingraben sind Ausdruck eines aktiven hydrothermalen Systems (vgl. Loges et al. 2012). Der Unterschied zu Lithiumerzlagerstätten in Gesteinen besteht darin, dass das Li noch in Lösung ist und keine Lithium-reichen Minerale gebildet hat. Eine zuverlässige Ressourcenabschätzung des in den Solon gelösten Lithiums erfordert ein gründliches Verständnis seines Ursprungs und seiner zeitlichen Entwicklung. Es gibt mehrere Theorien über den Ursprung von Lithium und die zeitliche Entwicklung von Fluiden im Oberrheingraben (vgl. Coffey et al. 2021, Dugamin et al. 2023,

Fontes und Matray 1993), jedoch sind Lithiumquelle und genaue Fluidwegsamkeiten weiter Bestandteil aktiver Forschung und im Detail ungeklärt (vgl. Jungmann et al. 2025, Dugamin et al. 2024).

Die Solen, die in den Geothermiekraftwerken gefördert werden, wurden kürzlich als beachtliche Lithiumressource mit 160-210 mg/L Lithium erkannt (vgl. Reich et al. 2023a, Sanjuan et al. 2016, 2022, Steiger et al. 2022), was die Explorationsaktivitäten intensiviert. Vulcan Energie Ressourcen geben an, dass sie über 26,6 Mt Lithiumkarbonat-Äquivalent (LCE) als Ressourcen in ihren Lizenzgebieten verfügen (vgl. LGB-RLP 2013, *Vulcan Energie Ressourcen GmbH* 2023). Im EnBW-Kraftwerk Bruchsal können schätzungsweise 1000 t LCE jährlich im industriellen Maßstab produziert werden (vgl. *UnLimited Projekt* 2022).

Eine weitere Lithiumressource in Geothermalwasser mit 162 mg/L Lithium liegt im tiefen Muschelkalk-Aquifer unter dem nördlichen Alpenvorland (Abbildung 1; vgl. Stober et al. 2023). Das Geothermalwasser fließt im Grundwasserleiter nach Norden. Die höchsten Lithiumkonzentrationen sind in den südlichen Teilen zu finden. Vermutlich stammen das Wasser und das Lithium aus der Fluid-Gesteins-Wechselwirkung mit kristallinen Grundgebirgsgesteinen (vgl. Stober et al. 2023).

6 Fazit

Lithium spielt eine zentrale Rolle in der Energiewende und der nachhaltigen Energieversorgung. Die Erforschung und Entwicklung innovativer Gewinnungsverfahren, insbesondere die Nutzung regionaler Ressourcen wie der Geothermalmässern in Deutschland, bieten vielversprechende Ansätze, um die Versorgung mit diesem kritischen Rohstoff zu sichern. Die kombinierte Extraktion von Lithium, Wärme und elektrischer Energie in Süddeutschland ist ein neues, innovatives Konzept, das jetzt vom Pilot- und Demonstrator-Maßstab in die industrielle Umsetzung gebracht werden muss. Hierzu sind eine Reihe von Sorbenzien auf ihre Vor- und Nachteile erforscht. Diese können, angepasst auf die Parameter jeder einzelnen Lagerstätte zum Einsatz gebracht werden. Parallel muss das geologische Verständnis der Lithiumressourcen und der Reservoirs erhöht werden, um die Ressource nachhaltig nutzen und neue Ressourcen erschließen zu können.

Bibliographie

- Amann, Florian / Bremer, Judith / Bruhn, David / Budt, Marcus / Bussmann, Gregor / Görke, Jens-Uwe / Grün, Gunnar / Hahn, Florian / Hanßke, Anja / Kohl, Thomas / Kolditz, Olaf / Regenspurg, Simona / Reinsch, Thomas / Rink, Karsten / Sass, Ingo / Schill, Eva / Schneider, Clemens David / Shao, Haibing / Teza, Dimitra / Thien, Leonhard / Utri, Matthias / Will, Harald (2022): *Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland I Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende*.
<https://doi.org/10.24406/ieg-n-645792>.
- Agemar, Thorsten / Alten, Jessica-Aileen / Ganz, Britta / Kuder, Jörg / Kühne, Klaus / Schumacher, Sandra / Schulz, Rüdiger (2014): „The Geothermal Information System for Germany – GeotIS“. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 165, 129–144.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2014/0060>.
- Agusdinata, Datu Buyung / Liu, Wenjuan / Eakin, Hallie / Romero, Hugo (2018): „Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda“. *Environmental Research Letters* 13(12), 123001.
- Ambrose, Hanjiro / Kendall, Alissa (2020): „Understanding the future of lithium: Part 2, temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling“. *Journal of Industrial Ecology* 24(1), 90–100.
- An, Jeon Woong / Kang, Dong Jun / Tran, Khuyen Thi / Kim, Myong Jun / Lim, Tuti / Tran, Tam (2012): „Recovery of lithium from Uyuni salar brine“. *Hydrometallurgy* 117, 64–70.
- Australian Government (2023): *Lithium - Resources and Energy Quarterly December 2023*. <https://www.industry.gov.au/publications/resources-and-energy-quarterly>.
- Europäische Kommission (2020): *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions: Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*. Brussels.
- Bajestani, Majid Bazrgar / Moheb, Ahmad / Masigol, Mohammadali (2019): „Simultaneous optimization of adsorption capacity and stability of hydrothermally synthesized spinel ion sieve composite adsorbents for selective removal of lithium from aqueous solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 58(27), 12207–12215.

- Barandiarán, Javiera (2019): „Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia“. *World Development* 113, 381–391.
- Becker, Ronald / Reischmann, Thomas (Eds.) (2021): *Geologie von Hessen*. Stuttgart: Schweizerbart.
- Binder, Thomas / Marks, Michael A.W. / Gerdes, Axel / Walter, Benjamin F. / Grimmer, Jens / Beranoguirre, Aratz / Wenzel, Thomas / Markl, Gregor (2022): „Two distinct age groups of melilitites, foidites, and basanites from the southern Central European Volcanic Province reflect lithospheric heterogeneity“. *International Journal of Earth Sciences* 112, 881–905. <https://doi.org/10.1007/s00531-022-02278-y>.
- Bowell, Robert / Lagos, Laura / de los Hoyos, Camilo / Declercq, Julien (2020): „Classification and characteristics of natural lithium resources“. *Elements* 16(4), 259–264.
- Bundesverband Geothermie (2021): *Informationsportal tiefe Geothermie*. https://www.red-drillingservices.at/fileadmin/user_upload/BVG_Tiefe_Geothermieprojekte_Platat_2021–22.pdf.
- Chitrakar, Ramesh / Makita, Yoji / Ooi, Kenta / Sonoda, Akinari (2012): „Selective uptake of lithium ion from brine by $H_{1.33}Mn_{1.67}O_4$ and $H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$ “. *Chemistry Letters* 41(12), 1647–1649.
- Chordia, Mudit / Wickerts, Sanna / Nordelöf, Anders / Arvidsson, Rickard (2022): „Life cycle environmental impacts of current and future battery-grade lithium supply from brine and spodumene“. *Resources, Conservation and Recycling* 187, 106634.
- Choubey, Pankaj K. / Kim, Min-Seuk / Srivastava, Rajiv R. / Lee, Jae-Chun / Lee, Jin-Young (2016): „Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources“. *Minerals Engineering* 89, 119–37.
- Choubey, Pankaj K. / Chung, Kang-Sup / Kim, Min-Seuk / Lee, Jin-Young / Srivastava, Rajiv R. (2017): „Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element Lithium. Part II: From sea water and spent lithium ion batteries (LIBs)“. *Minerals Engineering* 110, 104–121.
- Dahlkamp, J. Matthias / Quintero, Celso / Videla, Alvaro. / Rojas, René (2023): „Production processes for LiOH - A review“. *Hydrometallurgy*, 106217.
- DiPippo, R. (2012): *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. Butterworth-Heinemann.

- Dugamin, Elza J.M. / Boiron, Marie-Christine / Cathelineau, Michel / Richard, Antonin / Peiffert, Chantal / Lebreton, Alexandre / Banks, David A. / Despinois, Frank (2024): „Brine-granite interaction and lithium leaching in a continental rift (Soultz-sous-Forêts, Rhine Graben, France)“. *Lithos* 478–479, 107604. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107604>
- Gao, Aolei / Sun, Zhenhua / Li, Shaopeng / Hou, Xinjuan / Li, Huiquan / Wu, Qisheng / Xi, Xinguo (2018): „The mechanism of manganese dissolution on $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$ ion sieves with HCl“. *Dalton Transactions Cambridge* 47 (11), 3864–3871. <https://doi.org/10.1039/c8dt00033f>.
- Geyer, Otto F. / Gwinner, Manfred P. / Simon, Theo (52011): *Geologie von Baden-Württemberg*. Stuttgart: Schweizerbart.
- Gourcerol, Blandine / Gloguen, Eric / Melleton, Jeremie / Tuduri, Johann / Galieue, Xavier (2019): „Re-assessing the European lithium resource potential—A review of hard-rock resources and metallogeny“. *Ore Geology Reviews* 109, 494–519.
- Intaranont, Noramon / Garcia-Araez, Nuria / Hector, Andrew / Milton, J. Andy / Owen, John R. (2014): „Selective lithium extraction from brines by chemical reaction with battery materials“. *Journal of Materials Chemistry A* 2(18), 6374–6377.
- Hawash, Samah / Abd El Kader, Elham / El Diwani, Guzine (2010): „Methodology for selective adsorption of lithium ions onto polymeric aluminium (III) hydroxide“. *Journal of American Science* 6(11), 301–309.
- Han, Yosep / Kim, Hyunjung / Park, Jaikoo (2012): „Millimeter-sized spherical ion-sieve foams with hierarchical pore structure for recovery of lithium from seawater“. *Chemical Engineering Journal* 210, 482–489.
- He, Kanglin / Stober, Ingird / Bucher, Kurt (1999): „Chemical evolution of thermal waters from limestone aquifers of the Southern Upper Rhine Valley“. *Applied Geochemistry* 14, 223–235. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00046-8).
- Heidari, Nosrat / Momeni, Parvaneh (2017): „Selective adsorption of lithium ions from Urmia Lake onto aluminum hydroxide“. *Environmental Earth Sciences* 76(16), 1–8.
- Herrmann, Laura / Ehrenberg, Helmut / Graczyk-Zajac, Magdalena / Kaymakci, Elif / Kölbel, Thomas / Kölbel, Lena / Tübke, Jens

- (2022): „Lithium recovery from geothermal brine—an investigation into the desorption of lithium ions using manganese oxide adsorbents“. *Energy Advances* 1(11), 877–885.
- Hunter, James C. (1981): „Preparation of a new crystal form of manganese dioxide: λ - MnO_2 “. *Journal of Solid State Chemistry* 39 (2), 142–147. [https://doi.org/10.1016/0022-4596\(81\)90323-6](https://doi.org/10.1016/0022-4596(81)90323-6).
- Isupov, Vladimir P. / Kotsupalo, Natalja P. / Nemudry, Alexander P. / Menzeres, Leonid (1999): „Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions“. *Studies in Surface Science and Catalysis* 120, 621–652.
- Joo, Hwajoo / Kim, Seoni / Kim, Seongsoo / Choi, Minjune / Kim, Seung-Hyun / Yoon, Jeyong (2020): „Pilot-scale demonstration of an electrochemical system for lithium recovery from the desalination concentrate“. *Environmental Science: Water Research & Technology* 6(2), 290–295.
- Jungmann, Michèle. / Walter, Benjamin F. / Eiche, Elisabeth / Giebel, R. Johannes / Kolb, Jochen (2025): „The source of lithium in connate fluids: Evidence from the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts, Upper Rhine Graben, France“. *Journal of Geochemical Exploration* 270, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107641>.
- Kölbel, Lena / Kölbel, Thomas / Herrmann, Laura / Kaymakci, Elif / Ghergut, Iulia / Poirel, Arnaud / Schneider, Jochen (2023): „Lithium extraction from geothermal brines in the Upper Rhine Graben: A case study of potential and current state of the art“. *Hydrometallurgy* 221, 106131.
- Kuss, Christian / Carmant-Dérival, Murielle / Trinh, Ngoc Duc / Liang, Guoxian / Schougaard, Steen Brian (2014): „Kinetics of Heterosite Iron Phosphate Lithiation by Chemical Reduction“. *The Journal of Physical Chemistry C* 118(34), 19524–19528.
- Lawagon, Chosel / Nisola, Grace M. / Mun, Junyoung / Tron, Artur / Torrejos, Rey Eliseo / Seo, Jeong Gil / Kim, Hern / Chung, Wook-Jin (2016): „Adsorptive Li^+ mining from liquid resources by H_2TiO_3 : Equilibrium, kinetics, thermodynamics, and mechanisms“. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 35, 347–356.
- LGB-RLP (2013): *Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer*. https://mapclient.lgb-rlp.de/?app=lgb&view_id=21 (06.07.2025).
- Liebetreu, Daniel (2022): „Strategic Competition in South America’s Lithium Triangle. *InterAgency Journal*, 12-2.

- Loges, Anselm / Wagner, Thomas / Kirnbauer, Thomas / Göb, Susanne / Bau, Michael / Berner, Zsolt A. / Markl, Gregor (2012): „Source and origin of active and fossil thermal spring systems, northern Upper Rhine Graben, Germany“. *Applied Geochemistry* 27, 1153–1169. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.024>.
- Melnikov, Stanislav / Sheldeshov, Nicolay / Zabolotsky, Victor / Loza, Sergey / Achoh, Aslan (2017): „Pilot scale complex electrodialysis technology for processing a solution of lithium chloride containing organic solvents“. *Separation and Purification Technology* 189, 74–81.
- Meng, Fei / McNeice, James / Zadeh, Shirin S. / Ghahreman, Ahmad (2021): „Review of lithium production and recovery from minerals, brines, and lithium-ion batteries“. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 42, 123–41.
- Meshram, Pratima / Pandey, Banshi Dhar / Mankhand, Tilak Raj (2014): „Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review“. *Hydrometallurgy* 150, 192–208.
- Murodjon, Samadiy / Yu, Xiaoping / Li, Mingli / Duo, Ji / Deng, Tianlong (2020): „Lithium recovery from brines including seawater, salt lake brine, underground water and geothermal water“. *Thermodynamics and Energy Engineering*, 90371.
- Orooji, Yasin / Nezafat, Zahra / Nasrollahzadeh, Mahmoud / Shafiei, Nasrin / Afsari, Morteza / Pakzad, Khatereh / Razmjou, Amir (2022): „Recent advances in nanomaterial development for lithium ion-sieving technologies“. *Desalination* 529, 115624.
- Paranthaman, M. Parans / Li, Ling / Luo, Jiaqi / Hoke, Thomas / Ucar, Huseyin / Moyer, Bruce A. / Harrison, Stephen (2017): „Recovery of lithium from geothermal brine with lithium–aluminum layered double hydroxide chloride sorbents“. *Environmental Science & Technology* 51(22), 13481–13486.
- Peerawattuk, Ice / Bobicki, Erin (2018): „Lithium Extraction and Utilization: A Historical Perspective“. *Extraction* 2018. Springer, 2209–2224.
- Perez, Teresa Castillo (2023): „A Mini-Review of the Environmental Footprint of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles“. *Journal of Computers, Mechanical and Management* 2(3), 43–52.

- Prodromou, Konstantinos (2016): „Lithium adsorption on amorphous aluminum hydroxides and gibbsite“. *Eurasian Journal of Soil Science* 5(1), 13-16.
- Qian, Fangren / Guo, Min / Qian, Zhiqiang / Li, Quan / Wu, Zhijian / Liu, Zhong (2019): „Highly lithium adsorption capacities of $H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$ ion-sieve by ordered array structure“. *ChemistrySelect* 4(34), 10157-10163.
- Regenspurg, Simona / Feldbusch, Elvira / Norden, Ben / Tichomirowa, Marion (2016): „Fluid-rock interactions in a geothermal Rotliegend/Permo-Carboniferous reservoir (north German basin) “. *Applied Geochemistry* 69, 12-27.
- Reich, Rebekka Sophie (2024): *Novel materials for direct Li extraction from geothermal brine*. Karlsruhe: Dissertation KIT. <https://doi.org/10.5445/IR/1000173526>.
- Reich, Rebekka Sophie / Slunitschek, Klemens / Danisi, Rosa Micaela / Eiche, Elisabeth / Kolb, Jochen (2023a): „Lithium Extraction Techniques and the Application Potential of Different Sorbents for Lithium Recovery from Brines“. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1-20.
- Reich, Rebekka Sophie / Danisi, Rosa Micaela / Kluge, Thomas / Eiche, Elisabeth / Kolb, Jochen (2023b): „Structural and compositional variation of zeolite 13X in lithium sorption experiments using synthetic solutions and geothermal brine“. *Microporous and Mesoporous Materials* 359, 112623.
- Reich, Rebekka Sophie / Eiche, Elisabeth / Kolb, Jochen (2024): „Delithiation and lithiation of $LiFePO_4$: Implications for direct Li extraction from synthetic solutions and geothermal brines“. *Desalination*, 117883.
- Safari, Salman / Lottermoser, Bernd G. / Alessi, Daniel (2020): „Metal oxide sorbents for the sustainable recovery of lithium from unconventional resources“. *Applied Materials Today* 19, 100638.
- Sanjuan, Bernard / Millot, Romain / Innocent, Christophe / Dezayes, Chrystel / Scheiber, Julia / Brach, Michel (2016): „Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation“. *Chemical Geology* 428, 27–47.
- Sanjuan, Bernard / Gourcerol, Blandine / Millot, Romain / Rettenmaier, Detlev / Jeandel, Elodie / Rombaut, Aurélien (2022): „Lithium-rich

- geothermal brines in Europe: an up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources“. *Geothermics* 101, 102385. <https://doi.org/10.1016/j.geo-thermics.2022.102385>.
- Seip, Adam / Safari, Salman / Pickup, David M. / Chadwick, Alan V. / Ramos, Silvia / Velasco, Carmen A. / Cerrato, José. M. / Alessi, Daniel S. (2021): „Lithium recovery from hydraulic fracturing flow-back and produced water using a selective ion exchange sorbent“. *Chemical Engineering Journal* 426, 130713.
- Shi, Xi-Chang / Zhang, Zhi-bing / Zhou, Ding-fang / Zhang, Li-fen / Chen, Bai-zhen / Yu, Liang-liang (2013): „Synthesis of Li^+ adsorbent (H_2TiO_3) and its adsorption properties“. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23(1), 253–259.
- Schmidt, Michael (2023): *Rohstoffrisikobewertung – Lithium*. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur.
- Steiger, Katharina / Reich, Rebekka Sophie / Slunitschek, Klemens / Steinmüller, Klaus / Bergemann, Christian / Hilgers, Christoph / Kolb, Jochen (2022): *Lithium in Europa*. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien, Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000154047>.
- Stober, Ingrid / Bucher, Kurt (2015): „Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe“. *Geofluids* 15, 464–482. <https://doi.org/10.1111/gfl.12122>.
- Stober, Ingrid / Bucher, Kurt (2020): *Geothermie*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Stober, Ingrid / Wolfgramm, Markus / Birner, Johannes (2014): „Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland— hydrochemistry of deep waters in Germany“. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 41(42), 5–6.
- Stober, Ingrid / Grimmer, Jens Carsten / Kraml, Michael (2023): „The Muschelkalk aquifer of the Molasse basin in SW-Germany: implications on the origin and development of highly saline lithium-rich brines in calcareous hydrothermal reservoirs“. *Geotherm Energy* 11, 27. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00270-6>.
- Slunitschek, Klemens / Eiche, Elisabeth / Kolb, Jochen (2025): „Sorption of lithium and competing ions from geothermal brine to lithium manganese oxide sorbent and implication for industrial use“. *Separation and Purification Technology*, in review.

- Stringfellow, William T. / Dobson, Patrick F. (2021): „Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines“. *Energies* 14, 6805.
- Swain, Basudev (2016): „Separation and purification of lithium by solvent extraction and supported liquid membrane, analysis of their mechanism: A review“. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 91, 2549–62.
- Swain, Basudev (2017): „Recovery and recycling of lithium: A review“. *Separation and Purification Technology* 172, 388–403.
- Tian, Liyan / Ma, Wei / Han, Mei (2010): „Adsorption behavior of Li⁺ onto nano-lithium ion sieve from hybrid magnesium/lithium manganese oxide“. *Chemical Engineering Journal* 156(1), 134–140.
- Tran, Tam / Luong, Van T. (2015): „Lithium production processes“. *Lithium process chemistry*. Elsevier, 81–124.
- UnLimited ProjeKt (2022): *UnLimited, Hydrosion GmbH*. <https://geothermal-lithium.org/>.
- US Geological Survey (1996): *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/lithium/lithimcs96.pdf> (06.07.2025).
- US Geological Survey (2000): *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/lithium/450300.pdf> (06.07.2025).
- US Geological Survey (2020): *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-lithium.pdf> (02.07.2025).
- US Geological Survey (2021): *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf> (02.07.2025).
- US Geological Survey (2023): *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lithium.pdf> (02.07.2025).
- US Geological Survey (2025): *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-lithium.pdf> (02.07.2025).
- Ventura, Susanna / Bhamidi, Srinivas / Hornbostel, Marc / Nagar, Anoop / Perea, Elisabeth (2016): *Selective recovery of metals from geothermal brines*. SRI International, Menlo Park, CA (United States).

- Vera, María L. / Torres, Walter R. / Galli, Claudia I. / Chagnes, Alexandre / Flexer, Victoria (2023): „Environmental impact of direct lithium extraction from brines“. *Nature Reviews Earth & Environment* 4(3), 149–165.
- Voges, Adolf, / Toloczyki, Marcus / Zitzmann, Arnold / Wittekindt, Hanspeter / Trurnit, Peter (⁴2006): *Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (GK1000)*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- Vulcan Energie Ressourcen GmbH (2023): *Vulcan Zero Carbon Lithium™ project phase one DFS results and resources-reserves update*. Karlsruhe. <https://api.investi.com.au/api/announcements/vul/04ca21c8-1b4.pdf>.
- Warren, Ian (2021): *Techno-economic analysis of lithium extraction from geothermal brines*. Golden, CO: National Renewable Energy Lab. (NREL).
- Xiao, Jiali / Nie, Xiapyao / Sun, Shuying / Song, Xingfu / Li, Ping / Yu, Jianguo (2015): „Lithium ion adsorption–desorption properties on spinel $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$ and pH-dependent ion-exchange model“. *Advanced Powder Technology* 26(2), 589–594.
- Zhang, Qin-Hui / Li, Shao-Peng / Sun, Shu-Ying / Yin, Xian-Sheng / Yu, Jian-Guo (2010): „ LiMn_2O_4 spinel direct synthesis and lithium ion selective adsorption“. *Chemical Engineering Science* 65(1), 169–173.
- Zhang, Lingjie / Zhang, Tingting / Zhao, Yunliang / Dong, Guangfeng / Lv, Shuaike / Ma, Songliang / Song, Shaoxian / Quintana, Mildred (2023): „Doping engineering of lithium-aluminum layered double hydroxides for high-efficiency lithium extraction from salt lake brines“. *Nano Research*, 1–9.

D-MTUC das airborne Rohstofferkundungssystem der BTU

Rainer Herd

*(Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg BTU,
Cottbus)*

Abstract

D-MTUC is the identification of the research aircraft of the Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg. It was developed in 2012/2013 with international partners at the Chair of Raw Materials and Natural Resource Management under the direction of Prof. Herd as a raw material exploration system. The D-MTUC investigation system is based on a modified ultralight aircraft of the type “VIRUS SW 100” from the Slovenian manufacturer Pipistrel. It was designed as a low magnetic noise multi-sensor system. Depending on the application, various sensors can be installed under the wings, at the wing tips, in the fuselage or under the fuselage. The basic equipment consists of 2 potassium magnetometers, a 4 L cesium iodide gamma spectrometer, a VLF-EM system, a data acquisition and control system as well as a radar and laser altimeter. The aircraft has a number of special features that set it apart from other systems (composite construction, dismount ability, robustness, short take-off and landing distance, long range, very good rudder tuning, low fuel consumption). A special design feature is that the aircraft is equipped with spoilers. These allow contour flights that follow the topography – a significant advantage over other fixed-wing measurement platforms. The overall system has been able to demonstrate its performance capabilities in various projects in different regions under a wide range of conditions.

After 5 years working in Mongolia, the investigation system is now available again for use in Germany and Europe.

Resümee

D-MTUC ist das Kennzeichen des Forschungsflugzeugs der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Es wurde 2012/2013 mit internationalen Partnern am Lehrstuhl für Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft unter der Leitung von Prof. Herd als Rohstofferkundungssystem entwickelt. Das Messsystem D-MTUC basiert auf einem stark modifizierten Ultraleicht-Flugzeug des Typs „VIRUS SW 100“ des slowenischen Herstellers Pipistrel. Es wurde als rauscharmes Multi-Sensor-System konzipiert. Je nach Fragestellung können verschiedene Sensoren unter den Tragflächen, an den Tragflächenenden, im Rumpf oder unter dem Rumpf installiert werden. Die Basisausrüstung besteht aus 2 Kalium-Magnetometern, einem 4 L Cäsiumjodid Gammaskpektrometer, einem VLF-EM-System, einem Datenakquisitions- und Kontrollsystem sowie einem Radar- und Laserhöhenmesser. Das Flugzeug weist eine Reihe von Besonderheiten auf, die es von anderen Systemen merklich unterscheidet (Faserverbund-Bauweise, Zerlegbarkeit, Robustheit, geringe Start- und Landestrecke, große Reichweite, sehr gute Ruderabstimmung, geringer Treibstoffverbrauch). Eine konstruktive Besonderheit ist die Ausrüstung des Flugzeugs mit Störklappen. Diese erlauben die Durchführung von Konturflügen, die der Topographie folgen - ein bedeutender Vorteil gegenüber anderen Flächenflugzeugplattformen. Im Rahmen von diversen Projekten im In- und Ausland unter den verschiedensten Bedingungen konnte das Gesamtsystem seine Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit unter Beweis stellen. Nach einem 5-jährigen Einsatz in der Mongolei steht das Messsystem nun wieder für einen Einsatz in Deutschland und Europa zur Verfügung.

Keywords/Schlüsselwörter

Multi-sensor airborne exploration system, ultralight aircraft, aerogeophysical surveys;

Multi-Sensor airborne-Erkundungssystem, Ultraleichtflugzeug, aerogeophysikalische Erkundungen.

1 Einführung

Im Jahr 2012 begannen am Lehrstuhl Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft unter der Leitung des Autors die Arbeiten zur Entwicklung und Aufbau eines Multi-Sensor airborne System zur Rohstoff- und Erderkundung. Vorausgegangen war die Erkenntnis, dass aus den verschiedenen Gründen ein dringender Bedarf für ein neuartiges airborne Rohstoff- und Erderkundungssystem bestehe. Weltweit ist ein steigender Rohstoffbedarf zu verzeichnen, der eine verstärkte Explorationstätigkeit notwendig macht, welche aber mit bodengestützten Verfahren nicht zu bewältigen ist. Gleichzeitig besteht ein zunehmender Bedarf an flächenhaften Daten, die möglichst berührungslos, “minimal-invasiv” zu gewinnen sind. Auch dies ist mit bodengestützten Verfahren nicht zu realisieren. Die zunehmende Erschwerung für den Erhalt von Grundstücksbetreibungsgenehmigungen von den jeweiligen Grundstückseigentümern für die Durchführung von Explorationen stellen weitere Herausforderungen für die klassischen bodengestützten Erkundungsaufgaben dar. Ferner waren im Jahr 2012 kaum kommerzielle airborne Erkundungssysteme für kleine Budgets verfügbar und nicht zuletzt sollte der Lehrstuhl Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft durch den Aufbau eines airborne Erkundungssystems in die Lage versetzt werden Forschung und Ausbildung an aktuellen Fragestellungen zu betreiben und neue technologischen Entwicklungen zu erproben und weiterzuentwickeln. Die persönliche Beziehung des Autors zur Luftfahrt und Fliegerei spielte ebenfalls eine Rolle bei der Entscheidung für die Entwicklung eines solchen Systems.

2 Die Anforderungen

Zunächst wurden die Anforderungen an eine zu bauende Messplattform formuliert. Diese betrafen einerseits messtechnische Aspekte wie z. B. ein geringes magnetisches Störpotential der Konstruktion und eine möglichst geringe Mindestgeschwindigkeit zur Realisierung einer hohen Messpunktdichte. Aber auch fliegerisch/technische Aspekte wie eine ausreichende Nutzlast, eine robuste, buschtaugliche und dennoch leicht zerlegbare Bauweise damit ein breites Spektrum an Messsensoren mitgeführt und unterschiedliche Einsatzgebiete weltweit realisiert werden können, sollten berücksichtigt werden. Rechtliche Aspekte spielten ebenfalls

eine Rolle denn sämtliche, beabsichtigte technische Veränderungen und Modifikationen am Luftfahrzeug sollten rechtlich im Rahmen der gültigen Betriebserlaubnis möglich sein. Ferner sollte das System über ein Gesamtrettungssystem verfügen, das im Falle einer Notsituation das gesamte Fluggerät sicher am Fallschirm zum Boden bringt. Zu guter Letzt sollten auch die Gesamtkosten in einem überschaubaren Rahmen bleiben.

In einer Matrix (Tabelle 1) wurden die Anforderungen den verschiedenen möglichen Messgeräteträgerplattformen/Fluggeräten (Flächenflugzeug, Flächenflugzeug UL, Helikopter) gegenübergestellt und eine Bewertung in Form von „vollständig zutreffend“ (++), „zutreffend“ (+), „teilweise zutreffend“ (+-) und „nichtzutreffend“ (-) durchgeführt. Das mögliche Fluggerät Drohne konnte aufgrund der Nutzlast, die bei allen im zivilen Bereich verfügbaren Geräten zu gering war, nicht in die Bewertung einbezogen werden.

Aus der Bewertungs-Matrix ging das Flächenflugzeug UL (Ultraleicht-Flugzeug) als das geeignetstes Trägersystem hervor, wobei in puncto Nutzlast das Flächenflugzeug UL gegenüber den Mitbewerbern schlechter abschnitt. Die mögliche Nutzlast des Flächenflugzeug UL wurde aber als noch ausreichend bewertet.

Anforderung	Flächen- flugzeug	Flächen- flugzeug UL	Helikopter
kostengünstig (Anschaffung, Betrieb, Wartung, Jahresnachprüfung)	-	++	-
kompakt und leicht zerlegbar	-	++	-
robust (buschtauglich)	+	+	+
geringe Mindestgeschwindigkeit	-	+	++
hohe Reisegeschwindigkeit	+	+	+
Kunststoffbauweise (geringes Störpotential)	+-	+	+-
Modifikationen leicht realisierbar (technisch, rechtlich, Erhalt der Betriebserlaubnis)	-	+	-
ausreichende Nutzlast	++	-	++
Gesamtrettungssystem	-	+	-

Tab. 1: Anforderungen an das zu bauende Messsystem und Bewertung der möglichen Trägersysteme:
 „vollständig zutreffend (++)“, „zutreffend (+)“, „teilweise zutreffend“ (+-), „nicht zutreffend“ (-).

3 Auswahl und Modifikation der Trägerplattform

Nachdem die Entscheidung für ein Ultraleicht-Flugzeug als Messgeräteträger (Trägerplattform) gefallen war, wurden Flug- und Messgerätestests an einer Reihe von Ultraleichtflugzeugen durchgeführt. Diese dienten einerseits dazu deren flugtechnisches Verhalten (Ruderabstimmung, Verhalten in turbulenter Luft) zu ergründen und andererseits den Einfluss des Flugzeugs auf die Messverfahren und Messdaten zu erforschen. Zu diesem Zeitpunkt stand jedoch zunächst nur das VLF-EM-Messsystem zu Verfügung, weshalb sich die Gerätetest auf dieses System beschränken mussten. Die Entscheidung fiel auf das Model „Virus SW 100“ des slowenischen Herstellers Pipistrel, ein Ultraleicht-Flugzeug in Kunststoffbauweise (Glasfaser, Kohlefaser). Es überzeugte durch seine durchdachte Konstruktion aber insbesondere durch seine hervorragenden Flugeigenschaften. Um als Messgeräteträger fungieren zu können, mussten diverse Modifikationen vorgenommen werden. Dies geschah nach Rücksprache mit den Ingenieuren von Pipistrel, sodass diese Modifikationen bereits beim Bau des Flugzeugs Berücksichtigung fanden. Es wurde so eine Messplattform speziell zur Durchführung von geophysikalischen Messungen gebaut. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber anderen Flugzeug-Messsystemen bei denen in der Regel ein Standard-Flugzeug mit geophysikalischen Messgeräten ausgestattet wird und im Nachhinein versucht wird die Störeffekte des Flugzeugs zu reduzieren/minimieren.

Die nachfolgende Auflistung enthält die wesentlichen durchgeführten Modifikationen am Ultraleicht-Flugzeug Virus SW 100:

- Einbau von zusätzlichen Rippen an den Flügelenden zur Aufnahme der sensortragenden Stinger, sowie neuer Randbögen inkl. einer Analyse zum Flatterverhalten der Tragflächen bei höheren Geschwindigkeiten
- Einbau von Verstärkungen für die Aufnahme zusätzlicher Sensoren unter den Flächen (max. 10 kg Nutzlast pro Seite) und unter dem Seitenleitwerksträger
- Einbau von Halterungen im Gepäckraum zur Aufnahme eines γ -Spektrometers, eines Datenerfassungssystems sowie eines Laser- und Radarhöhenmessers.
- Einbau eines störungsarmen Generators

- Vergrößerung des Tankinhalts auf 130 Liter (Reichweite 1700 km)
- Einbau von mehreren Kabel-Leerrohren für die Verkabelung zusätzlicher Sensoren
- Ersatz von magnetischem Stahl (Schrauben, Bolzen)

4 Das Messsystem und seine Spezifikationen

Das fertiggestellte Messsystem stellt sich folgendermaßen dar (Abbildung 1). Markant treten die Magnetiksensoren-tragenden Stinger an den Flächenenden hervor. Ebenfalls äußerlich gut sichtbar ist die Halterung des VLF-Sensors, der sich unter der Rumpfröhre im Bereich des Leitwerksträgers befindet sowie die Positions- und Lagesensoren über dem Cockpit. Alle weiteren Sensoren und technischen Einbauten, wie der Gammaspektrometer, die Datenaufnahme- und Steuerungseinheit sowie Radar- und Höhenmesser sind im Inneren des Flugzeugs untergebracht.

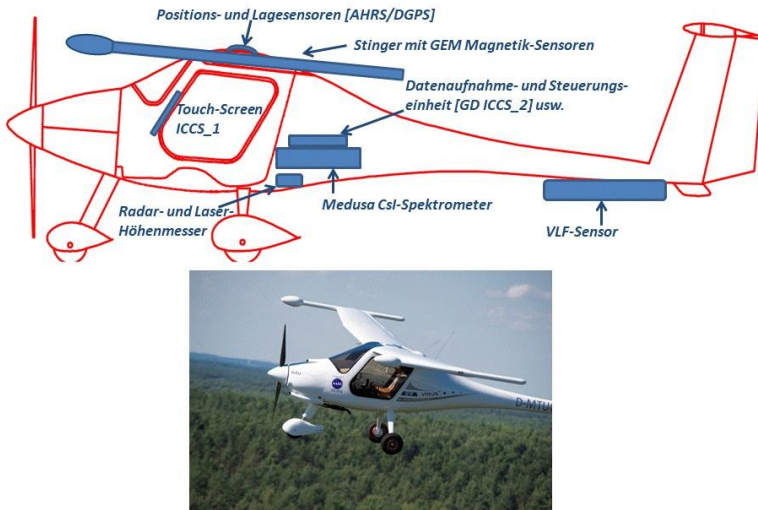


Abb. 1: Das Multisensor-airborne-Erkundungssystem D-MTUC (vgl. Herd 2022).

Die Basisinstrumentierung für Messflüge besteht aus:

- Kompensations-/ Datenakquisitionssystem ICCS von GeoDuster, Südafrika
- 2 K-GSMP 35 airborne Magnetometer von GEM, Kanada
- 1 γ -Spektrometer, mit einem 4 l CsI-Kristall von Medusa, Niederlande
- 1 VLF-EM-Empfänger von RMS, Kanada
- GPS-Navigationssystem von Septentrio, Belgien
- Radar- und Laser-Höhenmesser von ILM/Renishaw, England

Je nach Fragestellung können weitere Sensoren (wie z.B. Strap-down Gravimeter) in Messgerätegondel unter den Tragflächen oder im Bereich des Co-Pilotensitzes untergebracht werden.

Das Ultraleicht-Flugzeug ist ein Zweisitzer mit einer Gewichtsbeschränkung auf 475 kg maximaler Abflugmasse. Ohne Messinstrumentierung kann es mit zwei Personen (Pilot und Passagier) geflogen werden. Im Messbetrieb wird es generell aufgrund des zusätzlichen Gewichtes der Messausrüstung nur von einer Person, dem Piloten betrieben. Die nachfolgenden Abbildungen geben einen Eindruck vom Innenleben. Abbildung 2 zeigt einen Blick in den Gepäckraum (a) sowie einen Blick in das Cockpit (b) des Messflugzeugs.

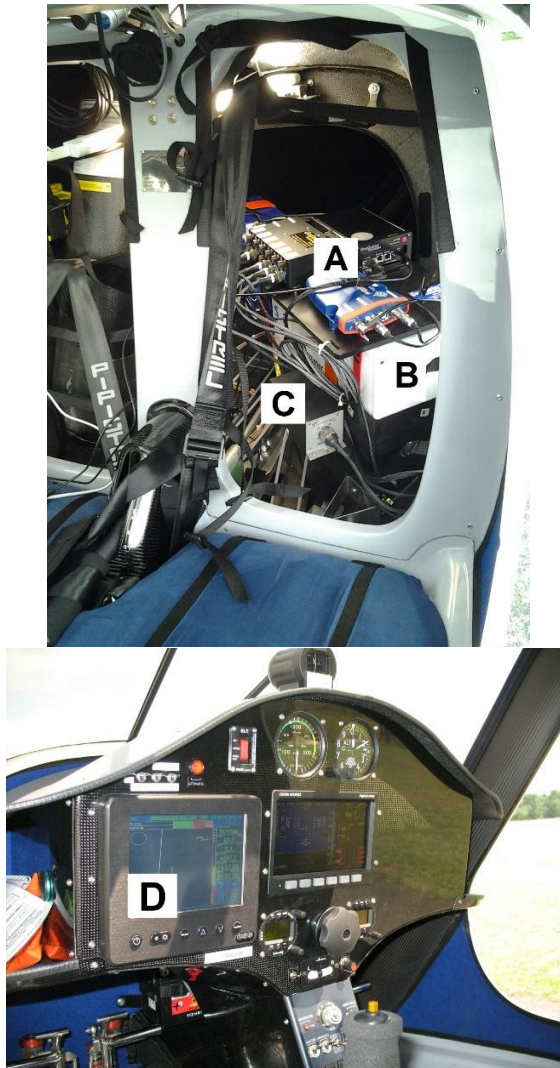


Abb. 2: Linkes Bild: Blick in den Gepäckraum mit den verbauten Geräten (A: Kompensations- und Datenakquisitionssystem sowie Navigationssystem, B: γ -Spektrometer, C: Laserhöhenmesser; Rechtes Bild: Blick in das Cockpit: D: Bildschirm für die Messflugüberwachung (Touch-Screen ICCS-1).

Das Gesamtsystem weist folgende Spezifikationen auf:

- Vollkunststoffkonstruktion (Glas- und Kohlefaser)
- geringes Gewicht, hohe Steifigkeit, geringes magnetisches Störpotential (low noise)
- Hochdecker, zusätzliche Messgeräte gondeln unter den Tragflächen montierbar
- leicht zerlegbar, weltweiter Transport im 40-Fuß-Überseecontainer möglich
- geringe Mindestgeschwindigkeit ($V_{\text{stall}} = 64 \text{ km/h}$), gute Langsamflugeigenschaften
- hohe Reisefluggeschwindigkeit ($V_{\text{Reise}} = 250 \text{ km/h}$)
- gute Kurzstart und -landefähigkeit (Startlänge: 95 m)
- sehr gute Manövrierbarkeit/Ruderabstimmung
- große Reichweite 1700 km, Verbrauch 10 - 12 l/h MOGAS (Super Plus) im Messflugbetrieb
- kostengünstig bezüglich Anschaffung, Betrieb, Wartung
- Gesamttrettungssystem

5 Einsatzbereiche, bisherige Erfahrungen und Bewertung

D-MTUC ist als Multi-Sensor-Messplattform konzipiert. Neben der Basisausstattung können weitere Sensoren integriert werden. Dadurch ergibt sich eine große Bandbreite von Einsatzmöglichkeiten. Neben der klassischen Erkundung von mineralischen Rohstoffvorkommen wie Energierohstoffen, Metallen und Industriemineralen sind der Einsatz bei geologischen Kartierungsarbeiten sowie im Bereich des Umweltmonitoring (radioaktive Belastungen in Altbergbauarealen, Überwachung von kerntechnischen Anlagen etc.) möglich. Ferner ist der Einsatz bei der Grundwasserprospektion (Erkundung von Kluftaquiferen) und der Erkundung der Verbreitung von Mooren (siehe Simon et al., 2020) denkbar.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass sowohl das Ultraleicht-Flugzeug also auch die Messelektronik sehr zuverlässig arbeitet. Selbst unter den klimatisch rauen Bedingungen während eines 5-jährigen Einsatzes in der Mongolei (Details siehe Herd, 2022) traten im Messbetrieb keine größeren Ausfälle auf. Lediglich die Datenspeicherung auf USB-Speichersticks führte bei Verwendung von kostengünstigen USB-Sticks zeitweise zu Ausfällen. Schäden am Flugzeug traten nur beim

Transport auf z.B. beim Hintransport in die Mongolei per Lkw sowie beim Rücktransport per Lkw, Bahn und Schiff. Hier sollte auf eine zusätzliche Sicherung von Befestigungsschrauben (z.B. durch Sicherungsdraht, Fokkernadel o.ä.) des Hauptfahrwerks und des Sporns geachtet werden. Die Spornverschraubung löste sich beim Hintransport, eine Befestigung des Hauptfahrwerks löste sich beim Rücktransport obwohl in beiden Fällen den Anweisungen des Herstellers Pipistrel zum Versand akribisch gefolgt wurde.

Als großer Vorteil erwiesen sich die an den Tragflächenoberseiten verbauten Störklappen (Abbildung 3). Mit deren Hilfe sind Kontourflüge möglich, das heißt das Messflugzeug kann exakt der Geländetopographie folgen und es besteht somit immer der gleiche Abstand zwischen Sensor und Geländeoberfläche. Dies stellt einen großen Vorteil zu sonstigen Flächenflugzeug-Messplattformen dar, die in der Regel in einer festgelegten Höhe über das Geländere relief fliegen und die Sensoren dadurch ständig unterschiedliche Distanzen zum Untersuchungsobjekt aufweisen. Der Topographie folgende Kontourflüge sind bei starkem Relief ansonsten nur mit einem Helikopter möglich.



Abb. 3: Ausgefahrene Störklappen an der Tragflächenoberseite.

Ausgefahrene Störklappen zerstören den Auftrieb in diesem Bereich der Tragfläche, sodass ein steiler Abstieg (großer Gleitwinkel) möglich ist und somit auch das Landen auf kurzen Pisten möglich macht. Ohne diese Einrichtung wären weder Kontourflüge über topographisch stark

bewegtem Gelände noch Landungen auf kurzen Pisten möglich gewesen. Der Einsatz des Messsystems in der Mongolei hätte ohne verbaute Störklappen deutlich eingeschränkter erfolgen müssen.

Bibliographie

- Herd, Rainer (2022): Aerogeophysikalische Rohstofferkundung in der Mongolei - ein Projekt im Rahmen der Deutsch-Mongolischen Rohstoffpartnerschaft. In: Kritische Rohstoffe, Gewinnung bis Entsorgung: Die Geowissenschaften als Problemlöser. Hrsg. Pfaff, G. & Greiling, R. O., Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Band 154.
- Siemon, Bernhard; Ibs-von Seht, Malte; Frank, Stefan, (2020): Airborne Electromagnetic and Radiometric Peat Thickness Mapping of a Bog in Northwest Germany (Ahlen-Falkenberger Moor). Remote Sensing, 12 (2), 203, <https://doi.org/10.3390/rs12020203>.

Recycling kritischer Rohstoffe in Deutschland

Norbert Rethmann

(RETHMANN-Gruppe)

Abstract

The following contribution emphasizes the pivotal role of the circular economy in ensuring a sustainable supply of critical raw materials and protecting the climate in Germany and Europe. Given the finite nature of resources and the growing global demand, particularly for future technologies such as electromobility and renewable energies, the recycling of critical raw materials is becoming increasingly important. With reference to the REMONDIS Group, this publication illustrates how recycling processes for metals, plastics, phosphorus and paper are successfully implemented in practice. At the Lippewerk plant, for instance, the Group's largest site, around 1.6 million tons of waste are processed each year, 70% of which is reused as secondary raw materials. Particular emphasis is placed on the recycling of waste electrical and electronic equipment, the recovery of phosphorus from sewage sludge (TetraPhos) and the recycling of plastics, paper, steel, aluminum and copper. These processes save considerable amounts of CO₂ and energy and strengthen security of supply. In addition, examples of raw materials obtained from animal by-products are also presented. Finally, the need for 'design for recycling' is underlined, technological innovation, and qualified specialists in order to fully exploit the potential of the circular economy.

Resümee

Der Beitrag beleuchtet die zentrale Rolle der Kreislaufwirtschaft für die Rohstoffversorgung und den Klimaschutz in Deutschland und Europa.

Angesichts endlicher Ressourcen und wachsender globaler Nachfrage – insbesondere durch Zukunftstechnologien wie Elektromobilität und erneuerbare Energien – gewinnt das Recycling kritischer Rohstoffe zunehmend an Bedeutung. Mit Bezug auf die REMONDIS-Gruppe wird in dem Beitrag anhand praktischer Beispiele gezeigt, wie Recyclingprozesse zur Rückgewinnung von Metallen, Kunststoffen, Phosphor und Papier erfolgreich umgesetzt werden. So werden etwa im Lippewerk, dem größten Standort der REMONDIS-Gruppe, jährlich rund 1,6 Mio. Tonnen Abfälle verarbeitet, wovon 70% als Recyclingrohstoffe wiederverwendet werden. Besonders hervorgehoben werden das Elektroaltgeräte-Recycling, die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm (TetraPhos), sowie das Recycling von Kunststoffen, Papier, Stahl, Aluminium und Kupfer. Diese Prozesse sparen nicht nur CO₂ und Energie in erheblichem Maße ein, sondern stärken auch die Versorgungssicherheit. Ergänzend werden auch Beispiele für Rohstoffe vorgestellt, die aus tierischen Nebenprodukten gewonnen werden. Abschließend wird die Notwendigkeit von „Design for Recycling“ betont, die Wichtigkeit technologischer Innovation und qualifizierter Fachkräfte, um das Potenzial der Kreislaufwirtschaft voll auszuschöpfen.

Keywords/Schlüsselwörter

Recycling raw materials, raw material supply, industrial recycling, security of supply, waste disposal, services, resource conservation

Recyclingrohstoffe, Rohstoffversorgung, Industrielles Recycling, Versorgungssicherheit, Entsorgung, Dienstleistung, Ressourcenschonung

Der Autor dieses Beitrags ist Ehrenvorsitzender des Aufsichtsrates der RETHMANN-Unternehmensgruppe. Er berichtet im Folgenden über die Innovationen, Leistungen und Erfahrungen der diversen Recycling-Unternehmen der familiengeführten Unternehmensgruppe bei der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abfällen und Nebenprodukten. Bei diesen Ausführungen ist es ihm wichtig, dass sie als persönlicher Kommentar und seine eigene Sichtweise verstanden werden.

Die RETHMANN-Gruppe besteht aus vier Unternehmenssparten: REMONDIS, Rhenus, SARIA und Transdev. Auf Basis der 2024er-Zahlen einschließlich der Kennzahlen von Transdev beschäftigt die Unternehmensgruppe nach der kürzlich erfolgten Übernahme der Mehrheit an der Transdev-Gruppe rund 200.000 Mitarbeiter und erzielt

einen Umsatz von gut 35 Milliarden Euro. Auch wenn die anderen Bereiche der Unternehmensgruppe sicherlich genauso interessant sind, liegt der Schwerpunkt dieses Beitrags im Wesentlichen auf REMONDIS sowie der Nutzung und den Potenzialen von Recyclingrohstoffen. Abbildung 1 weist auf die Wichtigkeit einer sicheren, dauerhaften und kostengünstigen Rohstoffversorgung für Deutschland hin.



Abb. 1: Überblick zu Rohstoffen: Eine große Zahl verschiedener Rohstoffe ist für die anhaltende Leistungsfähigkeit und den Wohlstand in Deutschland essenziell.

Zu den sechs wichtigsten Ressourcen der Erde zählen Wasser, Luft, Öl, Gas, Kohle und mineralische Rohstoffe. Sie werden verbraucht und sind endlich. Vor diesem Hintergrund hat der Weltrecyclingverband im Jahr 2018 den Global Recycling Day initiiert, der seither jeweils am 18. März begangen wird. Ziel ist es, das Recycling und den Wiedereinsatz von Recyclingrohstoffen stärker im öffentlichen Bewusstsein zu verankern und so das Recycling von Abfällen als siebte Ressource zu etablieren.

Im Jahr 2022 wurden in den 27 EU-Mitgliedsstaaten laut Eurostat insgesamt 1,99 Milliarden Tonnen Abfälle behandelt (vgl. Eurostat 2022). Ausgehend von einer durchschnittlichen Zuladung von 12 Tonnen könnten die aneinandergereihten Müllfahrzeuge allein mit den in den 27 europäischen Mitgliedsstaaten erzeugten Abfällen die Erde rund 37mal umrunden. Europaweit besteht damit noch ein erhebliches Potenzial für die Steigerung des Recyclings auf der einen und die Reduzierung der Deponierung von nicht inerten Abfallstoffen auf der anderen Seite.

Berücksichtigt man, dass wir in der EU im Jahr 2022 insgesamt 13,7 Tonnen pro Einwohner an Rohstoffen verbraucht haben (vgl. Eurostat 2025), wird die Bedeutung des Recyclings von Abfällen als siebte Ressource umso deutlicher.

Eine gesicherte Rohstoffversorgung ist ein zentrales Kriterium für die verlässliche Produktion von Unternehmen und damit zentral für die Wertschöpfung und den Wohlstand unserer Gesellschaft. Die europäische Wirtschaft ist abhängig von der Verfügbarkeit von rund 8 Mrd. Tonnen Rohstoffen im Jahr, von denen derzeit nur etwa 10% durch Recyclingrohstoffe abgedeckt werden (vgl. EUWID 2025).

Aktuell werden Produkte in Deutschland zu 85% auf Primärrohstoffbasis hergestellt. Der Autor dieses Beitrags glaubt allerdings nicht, dass die Unternehmen in Deutschland und Europa ihre gesamte Produktion komplett auf Recycling-Rohstoffe umstellen können. Aus seiner Sicht ist das illusorisch – aber die Kreislaufwirtschaft trägt dazu bei, die Abhängigkeit von Rohstoff-Importen zu verringern, da durch das Recycling zurückgewonnene Rohstoffe auf nationaler Ebene zur Verfügung stehen und dadurch weniger Primärrohstoffe importiert werden müssen. Die Kreislaufwirtschaft wird somit in den kommenden Jahren zwangsläufig zu einem zunehmend wichtigeren Akteur des Wirtschaftskreislaufes werden.

Abbildung 2 stellt die Entwicklung des weltweiten Ressourcenverbrauchs von 1900 bis 2060 dar. Es wird deutlich, welche enorme Zunahme an benötigten Rohstoffen in diesem Zeitraum vorliegt. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass der Pro-Kopf-Verbrauch in den einzelnen Ländern stark variiert. Mit steigendem Lebensstandard weltweit wird der Bedarf an Rohstoffen unweigerlich deutlich zunehmen.



Abb. 2: Der weltweite Ressourcenverbrauch für den Zeitraum von 1900 bis 2060.

Seit dem Beginn der Industrialisierung bis heute ist der weltweite Rohstoffbedarf massiv angestiegen. Diese Entwicklung wird sich angesichts des rasanten Bevölkerungswachstums auch weiter fortsetzen.

Lag der weltweite Rohstoffverbrauch im Jahr 1900 noch bei rund 10 Milliarden Tonnen, ist er bis 2016 bereits auf 70 Milliarden Tonnen angewachsen. Prognosen gehen davon aus, dass er 2060 bei 167 Milliarden Tonnen liegen wird (vgl. OECD 2019).

Dabei ist der Pro-Kopf-Verbrauch in einzelnen Ländern höchst unterschiedlich: Während jeder Deutsche statistisch rund 22 Tonnen Rohstoffe pro Jahr verbraucht und in China der Verbrauch etwa 12 Tonnen pro Kopf beträgt, liegt der Verbrauch in Indien bislang erst bei 4 Tonnen pro Kopf. In Malawi, einem der ärmsten Länder der Erde, liegt er sogar nur bei 0,3 Tonnen pro Kopf.

Der wachsende Wohlstand in allen Ländern wird in Verbindung mit dem Bevölkerungswachstum dazu führen, dass sowohl mehr Rohstoffe pro Kopf als auch in absoluten Zahlen verbraucht werden.

Ein entscheidender Faktor in Bezug auf Rohstoffe sind die Reserven bzw. Ressourcen. Reserven sind nachgewiesene, zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Energierohstoffmengen. Ressourcen dagegen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch-wirtschaftlich und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Energierohstoffmengen (vgl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2025).

Die Restverfügbarkeit von Rohstoffen wird mit der sogenannten statischen Reichweite beziffert. Sie gibt an, wie lange die Reserven bei aktueller jährlicher Fördermenge reichen würden – bei einzelnen Rohstoffen haben wir noch große Vorräte, aber je nach Rohstoff sind die Vorräte auch nur auf wenige Jahrzehnte begrenzt. Für alle Rohstoffe gilt aber grundsätzlich, dass die Ressourcen unserer Erde begrenzt sind und dass wir sie nicht leichtfertig verschwenden dürfen (Abbildung 3).

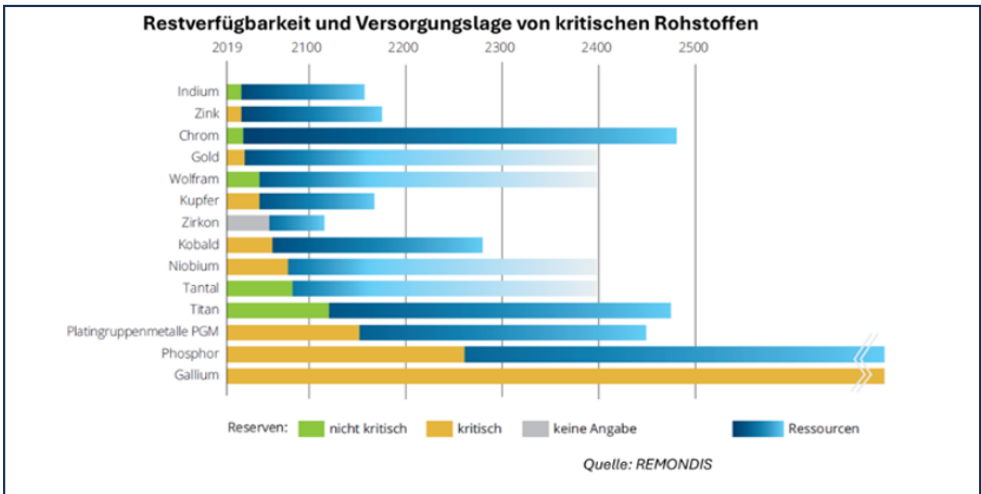


Abb. 3: Restverfügbarkeit und Versorgungslage von ausgewählten kritischen Rohstoffen (Quelle: REMONDIS).

Die Karte in Abbildung 4 zeigt ausgewählte Länder, aus denen die EU einen Rohstoff mehrheitlich bezieht und den prozentualen Anteil dieser Länder am gesamten Import dieses Rohstoffes in die EU (vgl. Europäische Kommission, Joint Research Centre 2020). In Deutschland und auch in der gesamten EU kommen viele der unabhkömmlichen Rohstoffe wie Kobalt und Seltene Erden kaum oder gar nicht vor. Und auch international ist die Versorgungslage kritisch, da das Angebot sich oft auf wenige Länder konzentriert.

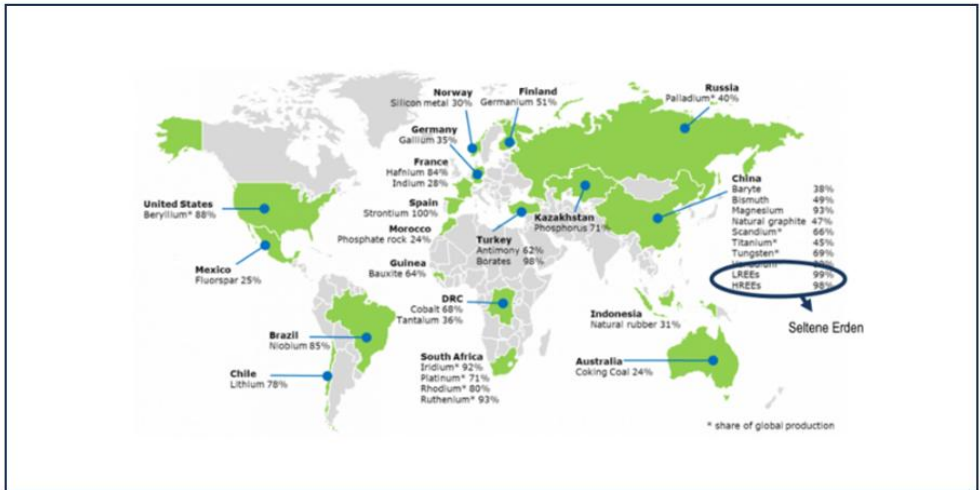


Abb. 4: Rohstofflieferanten der EU-Länder und damit verbundene wachsende Abhängigkeiten (Quelle: Joint Research Center der Europäischen Kommission, 2020).

Als nachhaltige Industriegesellschaft setzen wir mittlerweile alle technisch einsetzbaren Elemente des Periodensystems inklusive der Seltenen Erden ein, so z.B. in elektronischen und optischen Geräten, Sensoren und Brennstoffzellen. Auch in modernen Hybrid-Kraftfahrzeugen sind mindestens acht Elemente aus der Gruppe der sogenannten Seltenen Erden enthalten (vgl. Molycorp Inc. 2010). Abbildung 5 zeigt die Zunahme bei der industriellen Nutzung der Elemente des Periodensystems der Elemente (vgl. Faulstich 2020).

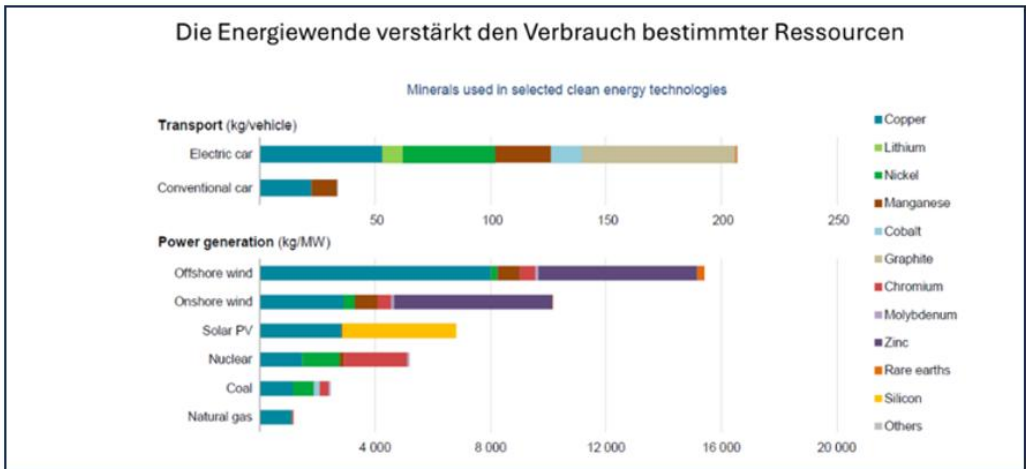


Abb. 6: Trends der Ressourcennutzung (Quelle: International Energy Agency 2021a).

Dadurch wird der kreislaufartigen Nutzung dieser Rohstoffe – also der Zurückführung der Rohstoffe als Recyclingrohstoff – in der Zukunft nicht nur aufgrund einer deutlich besseren Klima-/CO₂-Bilanz, sondern auch hinsichtlich der Versorgungssicherheit und einer möglichst unabhängigen Wirtschaft eine wichtige Bedeutung zukommen.

Für den Bau von Windkraftanlagen oder Solarpanelen werden viele Rohstoffe wie Lithium, Kobalt und Seltene Erden benötigt, die bei der fossilen Energiegewinnung, also dem Schwerpunkt der letzten Jahrzehnte, kaum eine Rolle gespielt haben. Der Bau eines typischen Elektroautos benötigt sechsmal mehr mineralische Rohstoffe als ein herkömmliches fossil betriebenes Auto, und ein Onshore-Windkraftwerk neunmal mehr als ein Gaskraftwerk mit gleicher Leistung (vgl. International Energy Agency 2021a). Die Stilllegung von Kohlekraftwerken und der Ersatz durch CO₂ neutrale Energieerzeugung mit der notwendigen Modifikation der Netze sowie ein geändertes Verbraucherverhalten bei der Nutzung von Energie wird also zunächst den Rohstoffbedarf massiv ansteigen lassen. Die IEA rechnet mit einem Anstieg der Nachfrage nach Lithium um das 40-fache bis 2040, Kobalt und Nickel werden 20- bis 25-fach stärker nachgefragt (vgl. International Energy Agency 2021b).

Insgesamt existieren vielfältige Recyclingpotenziale in der Kreislaufwirtschaft, die gehoben werden können und so den Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Rohstoffversorgung in Deutschland noch erhöhen können. Während die Recyclingraten bei einigen klassischen Metallen wie Eisen, Kupfer und Aluminium weltweit bereits über 50% liegen, besteht für sogenannte „High-Tech-Metalle“ und die „Seltenen Erden“ noch ein deutlicher Nachholbedarf (vgl. Prognos AG 2024b).

Ein Beispiel für die Potenziale der Kreislaufwirtschaft ist das Lippewerk in Lünen, das in Abbildung 7 gezeigt wird. Hier betreibt REMONDIS das größte Recyclingzentrum der industriellen Kreislaufwirtschaft in Europa. Auf einer Fläche von 230 Hektar sind eine Vielzahl von Recyclingprozessen konzentriert. Von Biogut über Metallschlacken bis hin zu Kunststoffen gewinnt REMONDIS im Lippewerk verschiedenste Wertstoffe aus Abfällen und führt sie in den Stoffkreislauf zurück. Täglich wird das Lippewerk von rund 700 bis 800 Lkw angefahren, die pro Jahr rund 1,6 Million Tonnen Abfälle anliefern. Rund 70% des Inputs verlassen das Werk als Produkt oder Rohstoff und werden wieder von der Industrie genutzt.



Abb. 7: Lippewerk von REMONDIS in Lünen.

Die Besonderheit ist, dass hier diese Verarbeitung mit der Systematik eines Industriebetriebes geleistet wird, also als industrielle Produktion.

Mit den folgenden Ausführungen und Abbildungen sollen einige Praxis-Beispiele näher vorgestellt werden. Abbildung 8 vermittelt zunächst einen Eindruck vom Recycling von Elektrogeräten.



Abb. 8: Recycling von Elektrogeräten.

Elektro- und Elektronik-Altgeräte enthalten wertvolle Materialien wie Kupfer, Gold und Platin. Elektroschrott ist einer der am schnellsten wachsenden globalen Abfallströme. Die Vereinten Nationen schätzen, dass im Jahr 2022 weltweit etwa 62 Millionen Tonnen Elektroschrott produziert wurden (vgl. International Telecommunication Union 2024). Dies entspricht einem Anstieg von 82% gegenüber 2010. In dem gigantischen Berg an Elektrik und Elektronik stecken Rohstoffe im Wert von Milliarden Euro.

Ihre Rückgewinnung dient nicht nur dem Werterhalt, sie leistet auch einen Beitrag zur Ressourcenschonung, erhöht die Versorgungssicherheit und mindert den Einsatz fossiler Energieträger. REMONDIS betreibt bereits seit über 30 Jahren Recyclinganlagen für Elektro- und Elektronikschrott. Mit hohen Verwertungsquoten gewinnt das Unternehmen Glas, Kunststoffe, Kupfer und Edelmetalle sowie Eisen- und Nichteisenmetalle zurück. Der Input sind Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Haushaltsgroßgeräte oder Kühlgeräte. Rund 75% der Materialien von Kleingeräten und Bildschirmen werden von REMONDIS zurückgewonnen. Als Recyclingrohstoff sind die Materialien vielfach direkt in der Produktion einsetzbar.

Weitere Wertstoffe werden in zusätzlichen Aufbereitungsprozessen für eine erneute Nutzung vorbereitet; Schadstoffe werden zuverlässig separiert und speziellen Aufbereitungs- oder Entsorgungswegen zugeführt.

Phosphor ist für jegliches Leben auf unserer Erde ein essenzieller Nährstoff. Die Versorgung unserer Landwirtschaft und Industrie mit diesem wertvollen Rohstoff wird zunehmend aufwendiger. Abgesehen von einer einzigen Mine in Finnland müssen wir in Europa sämtlichen Phosphor importieren. Die begrenzte Verfügbarkeit und schlechte Qualität der natürlichen Rohstoffvorräte zwingen uns quasi, Phosphor wieder zurückzugewinnen (Abbildung 9).

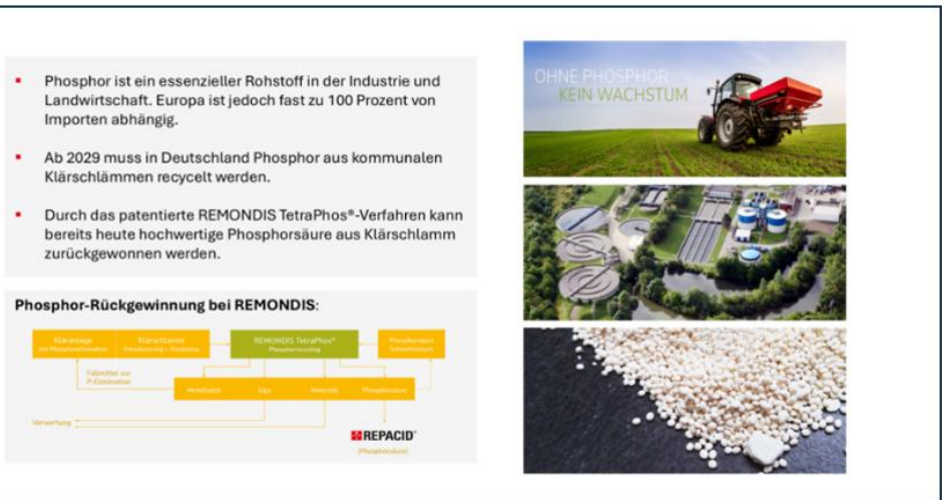


Abb. 9: Phosphorrecycling – ohne Phosphor heißt ohne Leben.

Es gibt eine Abfallfraktion, die überall auf der Welt anfällt und in hohen Mengen Phosphat enthält: Klärschlamm. Wie der Name schon sagt, entsteht Klärschlamm in Kläranlagen, also bei der Abwasserreinigung. REMONDIS hat als einer der Ersten überhaupt das Rohstoffpotenzial von Klärschlamm erkannt und schon vor Jahren ein Verfahren namens TetraPhos zur Rückgewinnung von Phosphor entwickelt. TetraPhos fügt sich wie ein Puzzleteil in die Prozesskette von Abwasserreinigung, thermischer Verwertung und Phosphorrückgewinnung ein. Damit schließt

sich der Stoff- und Wirtschaftskreislauf Phosphor erstmals insgesamt und nachhaltig.

Als Eingangsmaterial dient dabei die bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm zurückbleibende Klärschlamm-Asche. Dieser Asche wird Phosphorsäure zugeführt, die sich dann wiederum mit dem in der Asche befindlichen Phosphat anreichert. Am Ende entsteht so hochreine Phosphorsäure, die im Gegensatz zu natürlich abgebautem Phosphor komplett frei von Schwermetallen ist. Sie kann ohne Einschränkungen von der Industrie genutzt werden. Unter anderem für Dünger und Korrosionsschutzmittel. Darüber hinaus werden aus der Klärschlamm-Asche zusätzlich Gips für die Baustoffindustrie sowie Eisen- und Aluminiumsalze gewonnen, die unter anderem als Fällungsmittel zur Abwasserreinigung zum Einsatz kommen.

Die erste großtechnische Anlage zur Phosphorrückgewinnung betreibt REMONDIS bereits seit 2021 im Rahmen einer Öffentlich-Privaten Partnerschaft mit der Hansestadt Hamburg (Abbildung 10). Jährlich könnte REMONDIS allein in Hamburg aus 20.000 Tonnen Klärschlamm-Asche 7.000 Tonnen hochreine Phosphorsäure produzieren. Und das ist erst der Anfang, denn das Potenzial im Bereich des Phosphorrecyclings ist enorm. Würde man den gesamten jährlich in Deutschland anfallenden Klärschlamm – im Jahr 2021 sind 1,72 Millionen Tonnen Trockenmasse (TM) an kommunalen Klärschlämmen angefallen (vgl. Statistisches Bundesamt/Destatis 2023) – dem Tetra-Phos-Verfahren zuführen, entspräche das der CO₂-kompensierenden Wirkung von 27 Millionen Bäumen. Insgesamt könnte die EU theoretisch 270.000 Tonnen Phosphor pro Jahr aus Klärschlamm produzieren. Das würde ausreichen, um ein Fünftel des importierten Phosphors zu ersetzen, der in der EU zur Herstellung von Düngemitteln verwendet wird – oder einen noch größeren Prozentsatz des Phosphors, der zur Herstellung von Tierfutter verwendet wird.



Abb. 10: Neue Wege der Ressourcenschonung: Phosphorrückgewinnung.

In Haushalten und Gewerbebetrieben fallen täglich gewaltige Mengen Papier, Pappe und Karton an. Zusammen bilden sie unter der Bezeichnung Altpapier einen wertvollen Recyclingrohstoff, mit dem neue Papier- und Kartonagenprodukte hergestellt werden. Der konsequente und nachhaltige Altpapiereinsatz in der Papierindustrie schont nicht nur den Primärrohstoff Holz und die Umwelt, sondern auch das Klima (Abbildung 11).



Abb. 11: Papierrecycling – umweltfreundliche Lösungen mit großem Potenzial.

Die Alternative zur schädlichen Verringerung der Waldflächen ist das umweltfreundliche Recyclingpapier. Ganz ohne Frischfaser geht es nicht, aber das Papierrecycling bietet enorme Einsparpotenziale. Im Vergleich zum Primärfaserpapier ergeben sich beim Recyclingpapier Einsparungen von 50% bei der eingesetzten Energie und bei Wasser von 67% (vgl. Umweltbundesamt 2022a und 2022b). Zusätzliche Vorteile dabei sind deutlich geringere CO₂-Emissionen, ein verringerter Chemikalieneinsatz und die reduzierte Abwasserbelastung.

Aufgrund seiner ökologischen und ökonomischen Vorzüge entwickelte sich in Deutschland die im Altpapier enthaltene Holzstämmige Faser zum wichtigsten Rohstoff bei der Papier- und Kartonherstellung. Zum Anlagenverbund von REMONDIS gehören 14 moderne Papiersortieranlagen, von denen die leistungsfähigsten eine Jahreskapazität von 120.000 Tonnen Material verarbeiten. Sie gewährleisten die sortenreine Konfektionierung von rund 100 verschiedenen Sorten Altpapier (Abbildung 12).



Abb. 12: Altpapierrecycling – REMONDIS-Altpapiersortieranlage in Köln-Merkenich.

Papierfasern lassen sich bis zu siebenmal in den Stoffkreislauf zurückführen, um daraus neue Produkte herzustellen (vgl. Prognos AG (2024c)). Die Qualität nimmt dabei jedoch materialbedingt jedes Mal ab. In der Praxis ist das allerdings nicht auf die Faser bezogen erkennbar und auch irrelevant für den Prozess, da die Faser potenziell in jeder Papiersorte verwendet werden kann. Bedingt durch die Nutzung wird die Faser immer verschlissener bzw. kleiner. Irgendwann ist sie so „klein“, dass sie mit allen anderen Fasern, die entsprechend klein sind, in dem Aufbereitungsprozess der Papierfabriken ausgeschleust wird.

Kunststoff ist ein Material mit einer unglaublichen Vielfalt an werkstofflichen Eigenschaften. Mal ist es weich und flexibel, mal hart und stabil, mal transparent als Folie, mal farbenfroh als Verpackung. Aber fast immer ist der Ausgangsstoff Erdöl, und das ist weder unendlich verfügbar noch besonders umweltfreundlich in der Förderung und Aufbereitung. Deshalb ist Kunststoffrecycling kein ökologischer Luxus, sondern vielmehr eine zwingende Notwendigkeit im Dienst der Industrie und der Umwelt gleichermaßen (Abbildung 13).



Abb. 13: Recycling von Kunststoffen.

Wer Plastikabfälle recycelt, muss wissen, dass es sich mit dem Rezyklat ähnlich verhält wie beim Altpapierrecycling. So, wie beim Papier mit jedem Recyclingvorgang die Papierfasern kürzer werden, so verändern sich die Polymere des Kunststoffs mit jedem Recyclingprozess.

Dieser Umstand definiert auch beim recycelten Plastik die Verwendung für spezifische Produktgruppen, von hochwertigen Spritzgussteilen für die Fahrzeug- und Flugzeugindustrie über Bauteile für Computer und Unterhaltungselektronik bis zum Grundstoff für Flüssigkeitsbehälter, Abfalltonnen und Gartenbauelemente. Rund fünfmal lässt sich Kunststoff sinnvoll recyceln, erst dann wird er wieder zu dem, was Erdöl in der Regel ohnehin ist: Brennstoff für Energie und Wärme.

Auf jeder Stufe des Kunststoffrecyclings lässt sich der Klimaschutzeffekt konkret beziffern. Der Klimaschutzmehrwert im Vergleich zur Neuproduktion ist enorm: Jede Tonne Recyclingkunststoff spart im Vergleich zur Neuproduktion aus Primärrohstoffen zwei Tonnen Rohöl und bis zu 1,6 Tonnen CO₂ (vgl. Umweltbundesamt 2023a). Und jede Tonne, die recycelt wird, ist nicht nur eine Tonne weniger, die von der Industrie als Rohöl auf dem Weltmarkt eingekauft werden muss, sondern

sie ist auch eine Tonne weniger, die möglicherweise als schwimmender Abfall im Meer landet.

Die 550.000 Tonnen an Altkunststoffen, die REMONDIS pro Jahr erfasst, werden in einem aufwendigen Prozess sortiert und aufbereitet (Abbildung 14). Das finale Regranulat wird als Rohstoff der verarbeitenden Industrie zur Verfügung gestellt, wobei mehr als 60% der in Deutschland eingesetzten Rezyklate in der Bau- und der Verpackungs-Industrie verwendet werden (vgl. Conversio Market & Strategy GmbH 2022a).

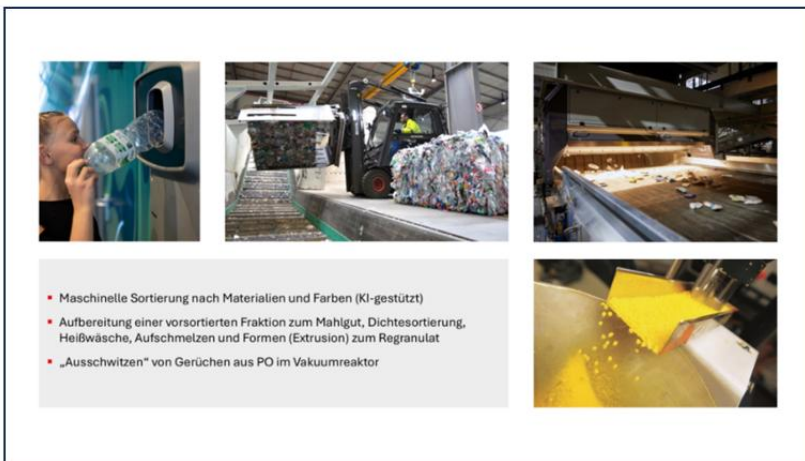


Abb. 14: Recycling von Kunststoffen – Aufbereitung.

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland 21 Millionen Tonnen Kunststoffe produziert und 6,3 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle gesammelt. Pro Person fällt in Deutschland 76 kg Kunststoffabfall pro Jahr an (vgl. Conversio Market & Strategy GmbH 2022b). Verpackungen machen mit 59% dabei den Hauptteil aus. Insgesamt fielen 2021 in Deutschland 3,2 Millionen Tonnen Kunststoffverpackungen an.

Stahlrecycling ist nicht nur die älteste, sondern auch mit Abstand die effektivste Form der Kreislaufwirtschaft. Seit über 3.000 Jahren wird Stahlschrott gesammelt, sortiert, wiederaufbereitet und neu verwendet (vgl. Prognos AG 2024a). Wir stehen heute an einem Wendepunkt, an dem unser Wirtschaftswachstum nicht mehr auf Primärrohstoffen,

sondern zunehmend auf Rohstoffen aus dem Recycling basieren muss. Stahlrecycling leistet hierzu einen herausragenden Beitrag, indem es uns ermöglicht, „Grünen Stahl“ herzustellen – Rohstahl mit einem möglichst hohen Schrottanteil, der unter Verwendung regenerativer Energiequellen produziert wird. Dies schont nicht nur wertvolle Primärrohstoffe, sondern leistet durch die hohe CO₂-Ersparnis auch einen herausragenden Beitrag zum Klimaschutz – allein in Deutschland werden jährlich bis zu 20 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Schrott bei der Rohstahlproduktion vermieden (vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl 2022). Abbildung 15 zeigt einen Sortier- und Verarbeitungsbetrieb für Metalle von der Firma TSR in Duisburg.



Abb. 15: Riesige Mengen an Metallschrott werden durch die TSR-Gruppe, die Teil von REMONDIS ist, wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt.

Eisen und Stahl stellen mit einer jährlichen Produktion von knapp 40 Millionen Tonnen in Deutschland die wohl wichtigste Metallfraktion dar. Stahl wird dabei vor allem in den deutschen Leitbranchen der Auto-

bil- und Maschinenbauindustrie eingesetzt. Der Anteil der Schrotteinsatzquote in der Rohstahlproduktion beziffert sich auf Basis aktueller Zahlen auf knapp 46% (vgl. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. 2023). Das bedeutet, dass jährlich allein in der deutschen Rohstahlproduktion annähernd 20 Millionen Tonnen Eisenschrott zum Einsatz kommen, was der Stahlmenge von fast 3.000 Eiffeltürmen entspricht.

Der Einsatz von 1 Tonne Stahlschrott bei der Rohstahlproduktion spart CO₂-Emissionen in Höhe von 1,67 Tonnen (vgl. Fraunhofer IMW 2020). Zudem werden durch den Einsatz von recyceltem Stahl endliche Primärrohstoffe wie Eisenerz und Kohle geschont und damit Klima- und Umweltkosten gespart. Aus einer Tonne Stahlschrott lässt sich so viel neuer Stahl erzeugen wie aus 1,5 Tonnen Eisenerz. Jede Tonne Stahlschrott führt bei der Erzeugung von Stahl zu einer Energieeinsparung von 72 bis 75% (vgl. American Iron and Steel Institute 2020).

Abbildung 16 zeigt eine der Anlagen der REMONDIS-Tochterfirma TSR, einem führenden Anbieter von Metallrecycling mit rund 170 Standorten.



Abb. 16: Höchste Recyclingqualität spart CO₂ bei der Stahlproduktion – TSR liefert zertifiziertes Inputmaterial für Stahlwerke.

Dank modernster Zerkleinerungs-, Entstaubungs- und Separationstechnik wird aus üblichen Vormaterialien – wie etwa Altfahrzeugen – das neuartige und zertifizierte TSR40 hergestellt, das einen Einsatz im Hochofen sowie eine Steigerung des Recyclinganteils im Konverterprozess ermöglicht und den CO₂-Ausstoß in der Stahlproduktion erheblich reduziert. Mit TSR40 gelingt, was bisher unmöglich schien. Es wird ausschließlich aus Post-Consumer-Material hergestellt, weist aber dennoch einen nahezu perfekten Reinheitsgrad auf. Der Eisengehalt liegt bei über 98%. Auf diese Weise erhalten Stahlhersteller ein exakt definiertes Inputprodukt mit dem sie hochwertigste Endprodukte herstellen können.

Auch bei den Nichteisenmetallen ist Recycling weit verbreitet und wird in Deutschland seit Jahrzehnten auf einem hohen Qualitäts- und Mengenniveau betrieben. NE-Metalle aus Recyclingrohstoffen herzustellen, ist um ein Vielfaches energie- und CO₂-sparender als die Fertigung aus Primärrohstoffen. Für alle NE-Metalle gilt, dass sie nahezu beliebig oft ohne Qualitätsverlust recycelt werden können. Schon allein das macht sie zum idealen Recyclingrohstoff (Abbildung 17).

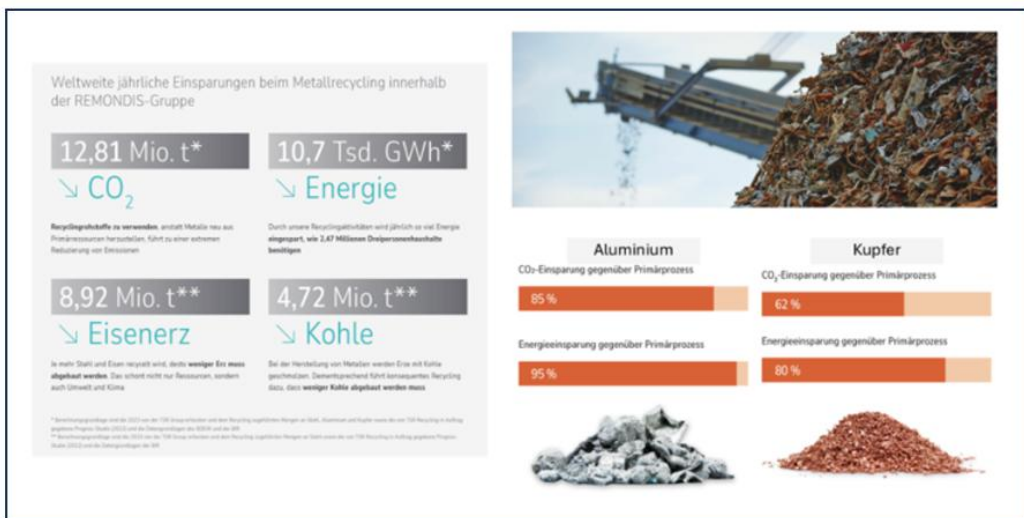


Abb. 17: Einspareffekte durch die Nutzung von Nichteisenmetallen als Recyclingrohstoff.

Aluminiumrecycling

Weltweit sind noch 75% des jemals geförderten Aluminiums im Umlauf. Aluminium zurückzugewinnen, ist um ein Vielfaches umweltschonender, energiesparender und emissionsärmer, als es aus dem Primärrohstoff Bauxit neu herzustellen. Jede Tonne recyceltes Aluminium führt zu einer Einsparung von 0,8 Tonnen weniger eingesetzte Primärrohstoffe und spart elf Tonnen CO₂ ein.

Kupferrecycling

Man benötigt 500 Tonnen Kupfererz, um eine Tonne reines Kupfer herzustellen. Dieselbe Menge lässt sich aus 20 Tonnen Elektrogeräten schöpfen. Es lohnt sich also extrem, bei der Kupferproduktion auf Recyclingrohstoffe zu setzen. Das haben auch die Kreislaufwirtschaft und die Industrie erkannt. Jede Tonne Recyclingmaterial führt bei der Erzeugung von Kupfer zu einer Energieeinsparung von 80% (vgl. Verband Deutscher Metallhändler und Recycler e.V. 2022).

Noch fast 80% des jemals geförderten Kupfers sind in Umlauf. Weltweit stammen rund 35% des produzierten Kupfers aus dem Recycling. In Deutschland beträgt der Anteil von recyceltem Kupfer in der Produktion rund 40% (vgl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2023).

Insgesamt hat die REMONDIS-Gruppe im letzten Jahr 249.000 Tonnen Kupfer für die Industrie zur Verfügung gestellt. Spezialbetriebe für besonders hochwertige Metalle – wie zum Beispiel Silber, Gold oder Platin – bilden einen weiteren Schwerpunkt in diesem Zusammenhang. Abbildung 18 zeigt einen entsprechenden Betrieb der REMONDIS-Gruppe in Moerdijk in Holland.



Abb. 18: Recycling der Edelmetalle von Gold bis Platin.

Der erste Schritt bei der Rückgewinnung von Edelmetallen aus Feststoffabfällen ist das Erhitzen auf 600-800°C für 8-10 Stunden. Danach wird das Material gemahlen und durch ein Sieb von 0,2 mm gepresst. In Gas- oder Induktionsöfen wird es anschließend eingeschmolzen und in Barren gegossen. Eine Analyse überprüft die Reinheit des finalen Produktes – pures Gold und Silber mit einem Reinheitsgrad von 99,99%. REMONDIS ist durch die London Bullion Market Association (LBMA) zertifiziert, so dass die hier produzierten Silberbarren überall auf der Welt gehandelt werden können.

Im Folgenden soll ein Beispiel aus dem Bereich der tierischen Nebenprodukte vorgestellt werden. Es handelt sich um das Kerngebiet der RETHMANN-Sparte SARIA. Dabei wird auf ein besonderes Produkt eingegangen, das in einer Fabrik in Palafolls in der Nähe von Barcelona hergestellt wird. Heparin ist vielen bekannt, aber die wenigsten wissen, dass dieser Rohstoff aus dem Darmschleim von geschlachteten Schweinen gewonnen wird (Abbildung 19).



Abb. 19: Produktion pharmazeutischer Wirkstoffe in Palafolls (Spanien).

Heparin ist ein lebensrettendes Medikament, das vor allem zur Vorbeugung und bei der Behandlung von Thrombosen und Embolien als Blutverdünner eingesetzt wird. Es wird in vielen verschiedenen medizinischen Zusammenhängen verwendet, wie z.B. bei Herzinfarkten, Schlaganfällen und Operationen. Schätzungen zufolge rettet Heparin jedes Jahr Millionen von Menschenleben. Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat Heparin genauso viele Leben gerettet wie Penicillin. Genau wie Penicillin steht Heparin auf der Liste der unentbehrlichen Arzneimittel der Weltgesundheitsorganisation WHO, die diejenigen Medikamente enthält, die als essenziell für die Deckung der dringlichsten Gesundheitsbedürfnisse der Menschheit angesehen werden (vgl. World Health Organization 2023).

Der Schleim im Dünndarm der Schweine enthält äußerst geringe Anteile von Heparin. Nach dem Schlachten im Schlachthof wird der Dünndarm aus den inneren Organen abgetrennt. Der Darmschleim wird erfasst und in einem aufwendigen Verfahren werden die Heparinanteile abgetrennt. In einem hochsterilen Produktionsumfeld wird der Heparin-Wirkstoff aus dem Darmschleim von 78 Millionen Schweinen gereinigt, aufkonzentriert und final an die Pharmaindustrie vermarktet.

Das Heparin ist aber nicht der einzige Rohstoff in diesem Zusammenhang. Der Dünndarm von Schweinen ist auch ein weltweit nachgefragtes Produkt für die Wurstindustrie (Abbildung 20). Viele Lebensmittelhersteller nutzen Naturdärme für die Produktion ihrer

Würste. Die wenigsten Menschen können sich allerdings die Prozesskette dabei vorstellen:

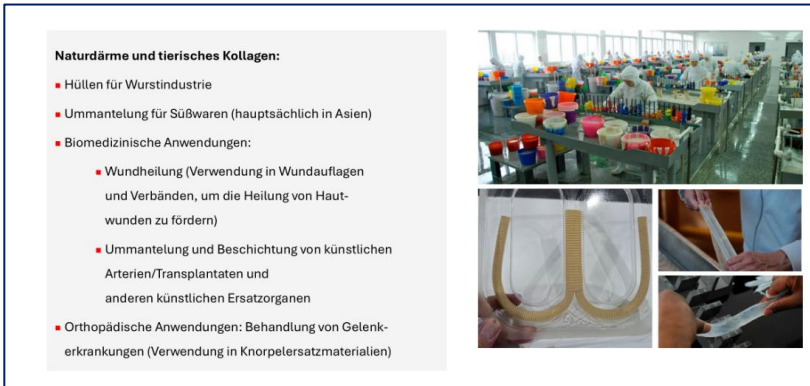


Abb. 20: Naturdärme und Kollagen sind nachgefragte Rohstoffe für die menschliche Ernährung. Kollagen wird darüber hinaus auch im pharmazeutischen Bereich eingesetzt.

Der Dünndarm von Schweinen ist ca. 18 bis 22 Meter lang. Er ist ein Naturprodukt, das bei jedem Schwein anders ist. Um sie zu standardisieren und nach Durchmesser zu kalibrieren, werden die Därme nach der Schlachtung nach China geschickt, wo sie entsprechend ihrem Durchmesser von Hand in einzelne Teilstücke zerschnitten werden.

Anschließend werden die Teilstücke, die dann alle den gleichen Durchmesser haben, gebündelt und weltweit an die Fleischindustrie vermarktet. Nur damit Sie eine Vorstellung haben: die 78 Millionen Darmpakete bedeuten 7.700 km Naturdarm pro Tag - das ist die Strecke zwischen Berlin und Sri-Lanka, die jeden Tag an Naturdärmen zu erfassen und zu verarbeiten sind.

Es gibt noch ein weiteres Produkt, das sich hervorragend für die Wurst-Herstellung eignet: Kollagen. Bei SARIA gewinnt man zum Beispiel aus den Häuten von Rindern tierisches Kollagen und produziert 9.400 Kilometer Kollagen-Darm pro Tag – das entspricht der Entfernung zwischen Berlin und San Francisco.

Darüber hinaus wird Pharma-Kollagen in Wundauflagen verwendet, um die Heilung oberflächlicher Wunden zu fördern. In der Chirurgie wird es als körperabbaubarer Stoff (Hämostat) verwendet, der die Gefäßgerinnung beschleunigt. Medizinische Materialien wie künstliche

Arterien, Transplantate, Zahnimplantate und andere künstliche Ersatzorgane werden aus Kollagen hergestellt oder damit beschichtet, um biokompatible Prothesen herzustellen oder die Geweberegeneration zu unterstützen. Auf dem linken Bild der Abbildung 20 sehen Sie zum Beispiel einen Kollagen-ummantelten Einsatz für eine Aorta. Die Anwendung von Kollagen beschleunigt die Heilung, beugt Infektionen vor und verbessert die Akzeptanz der implantierten medizinischen Komponenten in dem Körper (Abbildung 20).

Insgesamt tragen Recycling-Rohstoffe nicht nur dazu bei, die natürlichen Ressourcen zu schonen, sondern die Kreislaufwirtschaft verfügt darüber hinaus über erhebliche Potenziale zur CO₂-Minderung (Abbildung 21). Nach einer Studie für das Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz werden allein in Deutschland 60 Millionen Tonnen CO₂- Äquivalente jährlich durch das Recycling und den Einsatz von Recyclingrohstoffen vermieden (vgl. Umweltbundesamt 2023b). Durch das stoffliche Recycling in Europa wird so viel Energie eingespart, wie 32 Millionen deutsche Privathaushalte benötigen. Insgesamt können durch die Kreislaufwirtschaft weltweit die Treibhausgas-Emissionen um 39% und der Verbrauch an Rohstoffen um 28% gesenkt werden (vgl. Circle Economy & International Resource Panel der UNEP 2021).



Abb. 21: Treibhausgasminderung durch Kreislaufwirtschaft.

Am Anfang des Beitrags wurde auch das REMONDIS-Lippewerk erwähnt. Das Lippewerk ist sicherlich ein Industriegebiet, aber es hat die CO₂-Bilanz von 25.000 Hektar Wald. Laut einer von Prognos und dem INFA-Institut durchgeführten Studie werden durch die Aktivitäten allein an diesem Standort jährlich 488.000 Tonnen CO₂ im Vergleich zu

Primärprodukten eingespart. Das ist genug, um die Emissionen von 100.000 Langstreckenflügen zwischen Frankfurt und Sydney zu kompensieren.

Hersteller, Designer und Recycling-Unternehmen arbeiten heute idealerweise schon bei der Produktgestaltung zusammen, um von vorneherein die vollständige Rückgewinnung der im Produkt enthaltenen Wertstoffe zu gewährleisten.

Nur Rohstoffe aus Produkten, die sich wieder in ihre Komponenten und Materialien zerlegen lassen, können adäquat recycelt und wiedereingesetzt werden. Durch das „Design for Recycling“ können ressourcenschonende Produkte entwickelt werden, so dass Probleme in der Materialzusammensetzung, die gleich am Anfang des Produktkreislaufes vermieden werden können, nicht am Ende mit großem Aufwand gelöst werden müssen (Abbildung 22).

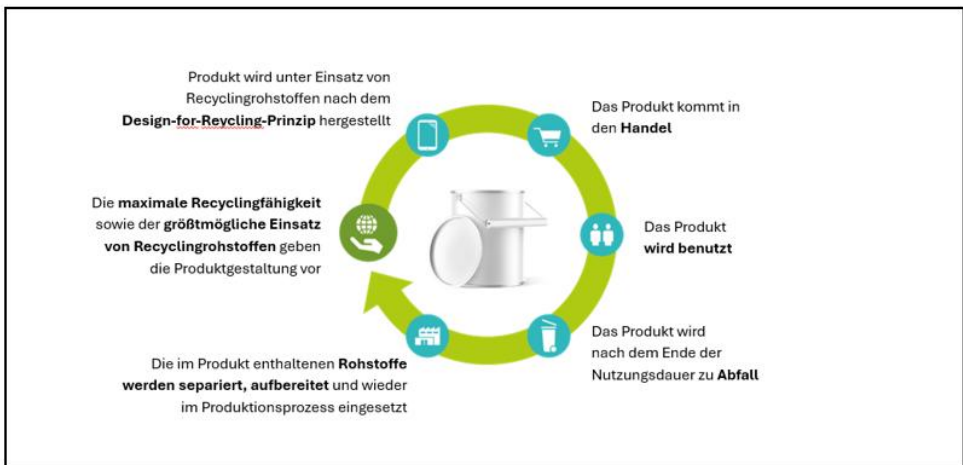


Abb. 22: Nachhaltige Produktion – dank „Design for Recycling“.

Notwendig ist auch eine Stärkung der Hochschullandschaft, um eine ausreichende Anzahl von qualifiziertem und motiviertem Nachwuchs für die Branche zu gewinnen. Da die Technisierung der gesamten Prozesskette der Kreislaufwirtschaft voranschreitet, steigt auch der Bedarf an entsprechend qualifizierten Mitarbeitern. Die Hochschulen können in enger Zusammenarbeit mit den operativ tätigen Unternehmen die Forschung und Entwicklungen vorantreiben.

Eine enge Zusammenarbeit zwischen Anlagenbetreibern, -planern und -herstellern sowie gezielte Forschungsprogramme für die Zukunftsbereiche der Kreislaufwirtschaft, wie beispielsweise die automatische Sortierung oder emissionsfreie Antriebe sowie der Einsatz von Künstlicher Intelligenz, wird auf allen Wertschöpfungsstufen zu weiteren Anstrengungen bezüglich der Vermeidung von CO₂ führen und dabei technologisches Neuland betreten. Die Verbände und die größeren Unternehmen der Kreislaufwirtschaft können an dieser Stelle wichtige Impulse geben, die Entwicklungen begleiten und dazu beitragen, dass Hemmnisse bei der Einführung von neuen Technologien beseitigt werden.

Bibliographie

- American Iron and Steel Institute (2020): Steel Sustains in Recyclability Fact Sheet. Verfügbar unter: <https://www.steel.org/wp-content/uploads/2020/09/Steel-Sustains-in-Recyclability-Fact-Sheet.pdf>.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief Kupfer. Hannover: BGR. Seite 2. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_cu.pdf.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2025): https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Rohstoffe/Energierohstoffe/energierohstoffe_nodee.
- Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (2023): Deutsche Stahlrecycling-Bilanz 1980 bis 2022. Düsseldorf. Seite 2.
- Circle Economy & International Resource Panel der UNEP (2021): Circularity Gap Report 2021. Amsterdam: Circle Economy. Seite 16. Verfügbar unter <https://www.circle-economy.com/resources/circularity-gap-report-2021>.
- Conversio Market & Strategy GmbH (2022a): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021 – Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen (Kurzfassung, November 2022). Bad Homburg. Seite 17. Verfügbar unter: https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf.

- Conversio Market & Strategy GmbH (2022b): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021 – Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen (Kurzfassung, November 2022). Bad Homburg. Seite 16. Verfügbar unter: https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf.
- Europäische Kommission, Joint Research Centre (2020): Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, Brüssel, Seite 4. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- Eurostat (2022): (Datensatz env_wastrt) Growth in waste recovery in 2022. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241017-1>.
- Eurostat (2025): Sustainable development in the European Union – Monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context – 2025 edition, Kapitel zu SDG 12 „Responsible consumption and production“. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/63309.pdf>.
- EUWID (2025): Statement der stellvertretenden Leiterin des Bereichs „Circular Economy“, Karolina D’Cunha, in der Generaldirektion Umwelt der EU-Kommission bei der Circular-Economy-Konferenz im Februar 2025 in Düsseldorf (EUWID Recycling und Entsorgung 04.02.2025, S. 30).
- Faulstich, Martin (2020): „Circular Economy – Herausforderungen und Perspektiven“. *Nachhaltige Industrie*, 1. Jg., S. 6-14.
- Fraunhofer IMW (2020): „Schrottbonus konkret – Instrumente für fairen Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung.“ Im Auftrag der BDSV. Leipzig. Seite 4. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/13584f21-86d2-4ce5-bc52-a0a4bb160f32/download>.
- International Energy Agency (2021a): “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris“. Seite 5, Mai 2021. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- International Energy Agency (IEA) (2021b): “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions2. Paris. Seite 103. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

- International Telecommunication Union (2024): “United Nations University (UNU) u. a. The Global E-waste Monitor 2024”. Genf. Seite 6. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Publications/The-Global-E-waste-Monitor-2024.aspx>.
- Molycorp Inc. (2010): Nach British geological Survey, Rare Earth Elements, Juni 2010.
- OECD (2019): “Global Material Resources Outlook to 2060”. OECD Publishing. Seite 5. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- Prognos AG (2024a): „Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024“. Berlin. Seite 8. Verfügbar unter: https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/download/Statusbericht_2024_25012024.pdf.
- Prognos AG (2024b): „Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024“. Berlin. Seite 160. Verfügbar unter: https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/download/Statusbericht_2024_25012024.pdf.
- Prognos AG (2024c): „Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024“. Berlin. Seite 50. Verfügbar unter: https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/download/Statusbericht_2024_25012024.pdf.
- Statistisches Bundesamt/Destatis (2023): „Tabelle 32214-0001 – Klärschlamm entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung“. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de> (Tabelle abrufbar über GENESIS-Online-Datenbank).
- Umweltbundesamt (2022a): „Aktualisierte Ökobilanz von Grafik- und Hygienepapier“. TEXTE 123/2022. Dessau-Roßlau. Seite 6. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_123-2022_aktualisierte_oekobilanz_von_grafik_und_hygienepapier.pdf.
- Umweltbundesamt (2022b): „FAQs für Recyclingpapier“. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/6232/publikationen/faq_recyclingpapier_2022.pdf.
- Umweltbundesamt (2023a): „Untersuchung ökonomischer Instrumente zur Verringerung des Verpackungsverbrauchs sowie zur Stärkung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Texte 87/2023.

Herausgeber: Umweltbundesamt, Autoren: ifeu, Ökopool, Fraunhofer ISI u. a.

Umweltbundesamt (2023b): „Ermittlung der Klimaschutzpotentiale in der Kreislaufwirtschaft für Deutschland und die EU – Teilbericht Deutschland“, Texte 83/2023. Herausgeber: Umweltbundesamt, Autoren: ifeu, Öko-Institut, ARGUS Berlin.

Verband Deutscher Metallhändler und Recycler e.V. (2022): „Fakten zum Metallrecycling“. Berlin: VDM. Seite 2. Verfügbar unter: <https://www.vdm.berlin/wp-content/uploads/2022/09/Fakten-zum-Metallrecycling.pdf>.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022): „Engagement für Stahl – Jahresbericht 2022“. Düsseldorf. Seite 54. Verfügbar unter: https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Jahresbericht_2022_RZ-neu_Web.pdf.

World Health Organization (2023): “Model List of Essential Medicines – 23rd List”, Genf, Seite 43. Verfügbar unter: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/371090/WHO-MHP-HPS-EML-2023.02-eng.pdf>.

Diversifikation der Rohstoffimporte Deutschlands am Beispiel Skandinaviens

Axel Müller

(MLS, Oslo, Norwegen)

Abstract

In May 2024, the Critical Raw Materials Act came into force, aiming to secure the supply of critical raw materials for European industry. By 2030, 10% of raw material extraction, 40% of processing, and 25% of recycling of strategic raw materials should take place within the EU. Additionally, no more than 65% of the demand for any raw material should be met from a single non-European country. This latter goal is to be achieved by diversifying the countries from which raw materials are imported. Germany imports large quantities of critical raw materials. Ores that are imported more than 65% from a single country include, among others, magnesium, rare earth metals, and bismuth from China; niobium-tantalum from Thailand; bauxite from Guinea; and lithium from Chile. Supply chains are often built over many years, but sometimes lack sufficient diversity in terms of origin countries. This makes them vulnerable to changes in the geopolitical landscape. The COVID-19 pandemic, Russia's invasion of Ukraine in 2022, and the trade policies of the current U.S. administration have led to unexpected and abrupt disruptions in global supply chains, affecting Germany as well. As the world's third-largest importer of nickel, Germany sourced about 40–50% of its refined nickel from Russia until 2022. When Russia considered a nickel export ban, Germany was forced to quickly adjust its import strategy. In

this case, Norway was able to cover a large portion of Germany's nickel imports and has been the most important supplier of refined nickel since 2023, with a share of 29%. The Scandinavian countries – Finland, Sweden, and Norway – are traditional mining nations with significant deposit potential, especially for critical raw materials. Due to their proximity to Germany and stable geopolitical conditions, they are attractive raw material partners. Germany has been importing concentrates or intermediate products of critical raw materials from Scandinavia for many years. In light of the rapidly changing geopolitical situation, greater diversification of raw material import countries should be pursued, with increased involvement of Scandinavia – even if no disruptions in existing supply chains are currently evident.

Resümee

Im Mai 2024 trat der Rechtsakt für kritische Rohstoffe „Critical Raw Materials Act“ in Kraft, der darauf abzielt, die Versorgung der europäischen Industrie mit kritischen Rohstoffen zu sichern. Bis 2030 sollen 10% der Rohstoffförderung, 40% der Weiterverarbeitung und 25% des Recyclings strategischer Rohstoffe in der EU durchgeführt werden, und nicht mehr als 65% des Bedarfs eines Rohstoffs aus nur einem nicht-europäischen Land gedeckt werden. Letzteres Ziel soll durch die Diversifikation der Rohstoffimportländer erreicht werden. Deutschland importiert große Mengen kritischer Rohstoffe. Erze die mit mehr als 65% aus einem Land importiert werden, sind, unter anderen, Magnesium, Seltenerdmetalle und Wismut aus China, Niob-Tantal aus Thailand, Bauxit aus Guinea und Lithium aus Chile. Die Lieferketten werden oft über viele Jahre hinweg aufgebaut, jedoch mit teilweise unzureichender Diversität der Herkunftsländer. Das macht die Lieferketten anfällig für Änderungen der geopolitischen Situation. Die COVID-19-Pandemie, der russische Angriff auf die Ukraine im Jahr 2022 und die Zollpolitik der gegenwärtigen US-Regierung haben zu unerwarteten und abrupten Störungen der globalen Lieferketten geführt, von denen auch Deutschland betroffen ist. Deutschland als weltweit der drittgrößte Importeur von Nickel, bezog bis 2022 etwa 40-50% des benötigten Raffinadennickels aus Russland. Da Russland ein Exportverbot für Nickel in Betracht zog, war Deutschland gezwungen, seine Nickelimporte kurzfristig umzustellen. In diesem Fall konnte Norwegen einen Großteil der deutschen Importe decken und ist seit 2023 mit einem Anteil von 29% das bedeutendste Lieferland für Raffinadennickel. Die skandinavischen Länder Finnland, Schweden

und Norwegen sind traditionelle Bergbauländer mit einem großen Lagerstättenpotenzial, insbesondere für kritische Rohstoffe. Aufgrund der Nähe zu Deutschland und der stabilen geopolitischen Lage sind sie attraktive Rohstoffpartner. Deutschland importiert seit vielen Jahren Konzentrate bzw. Zwischenprodukte kritischer Rohstoffe aus Skandinavien. Angesichts der sich momentan drastisch ändernden geopolitischen Situation, sollte eine stärkere Diversifikation der Rohstoffimportländer unter verstärkter Einbeziehung Skandinaviens angestrebt werden, selbst wenn keine Störungen bestehender Lieferketten offensichtlich sind.

Keywords/Schlüsselwörter

Critical Raw Materials Act, raw material imports, supply chains, refined nickel, raw materials from Scandinavia, diversification of raw material import countries;

Critical Raw Materials Act, Rohstoffimporte, Lieferketten, Raffinadenickel, Rohstoffe aus Skandinavien, Diversifikation der Rohstoffimportländer.

1 Einleitung

Die deutsche Industrieproduktion ist stark abhängig von Rohstoffimporten. Lieferkettenstörungen, wie zum Beispiel während der Covid-Pandemie, der Ukrainekrieg, die Zunahme von Handelskonflikten und eine generelle Verschärfung der geopolitischen Situation in den letzten Jahren führte weltweit zu einem intensiveren Wettbewerb um den Zugang zu und die Kontrolle über Rohstoffe. Um die Kritikalität der Rohstoffsituation für die europäische Industrie zu quantifizieren, publiziert die Europäische Kommission seit 2011 alle drei Jahre eine Liste kritischer Rohstoffe. Kritische Rohstoffe sind wirtschaftlich wichtige Rohstoffe, die durch ein hohes Versorgungsrisiko gekennzeichnet sind. Im Jahr 2023 führte die Europäische Kommission zusätzlich den Begriff „strategische Rohstoffe“ ein, basierend auf zukünftigen Produktions- und Bedarfsrisiken. Die meisten der aktuell 34 von der EU gelisteten kritischen sowie 17 strategischen Rohstoffe werden von außerhalb der EU importiert, nicht selten von Ländern, die als geostrategisch instabil oder Konkurrenten gelten.

Um die Risiken und Abhängigkeiten von kritischen und strategischen Rohstoffen zu reduzieren, erließ die Europäische Kommission am 23. Mai 2024 den Rechtsakt für kritische Rohstoffe (Critical Raw Materials

Act, CRMA). Das zentrale Ziel der Europäischen Union ist die Versorgungssicherheit der Industrie mit Rohstoffen. Gleichzeitig gehört der CRMA zusammen mit der Reform des Strommarkts zu den rechtlichen Leitinitiativen des Green Deals, mit dem wiederum die EU bis 2050 klimaneutral werden und ihren Verpflichtungen im Rahmen des Übereinkommens von Paris nachkommen möchte. Die Verordnung sieht weiterhin eine Straffung der Genehmigungsverfahren für Projekte zu kritischen Rohstoffen vor, bei gleichzeitiger Gewährleistung eines hohen Maßes an sozialem und ökologischem Schutz. Darüber hinaus werden ausgewählte Projekte zu strategischen Rohstoffen beim Zugang zu Finanzmitteln unterstützt und die Dauer von Genehmigungsverfahren verkürzt (27 Monate für Bergbauprojekte und 15 Monate für Weiterverarbeitungs- und Recyclingprojekte). Die EU-Mitgliedstaaten sind aufgerufen, nationale Programme für die geologische Erkundung ihrer Ressourcen zu entwickeln. Zudem werden Partnerländer ausgewählt, in denen strategische Rohstoffe gezielt gewonnen werden sollen. Der Anteil am heimischen, sprich innereuropäischen Bergbau, soll bis zum Jahr 2030 auf zehn Prozent anwachsen, die Weiterverarbeitung von strategischen Rohstoffen in der EU soll sich auf 40 Prozent verdoppeln, und wiedergewonnene Rohstoffe aus der Kreislaufwirtschaft sollen mindestens 25 Prozent zur Rohstoffversorgung beitragen. Zudem sollen die Abhängigkeiten bei spezifischen Rohstoffen von einzelnen Ländern auf maximal 65 Prozent reduziert werden.

Deutschland baut von den von der EU als kritisch eingestuften Rohstoffen derzeit nur die Industriemineralie Flussspat, Schwerspat, Feldspat, Grafit sowie Quarz als Ausgangsmaterial für die Siliziumherstellung ab. Daher ist die deutsche Industrie gezwungen, große Mengen anderer benötigter kritischer Rohstoffe zu importieren. Rohstoffe, die mit mehr als 65% aus einem Land nach Deutschland importiert werden sind, unter anderen, Magnesium, Seltenerdmetalle und Wismut aus China, Niobium-Tantal aus Thailand, Bauxit aus Guinea und Lithium aus Chile. In Tabelle 1 sind die kritischen Importabhängigkeiten für Deutschland mit >65% aus EU- und nicht-EU-Ländern aufgelistet. Entsprechend dem CRMA müsste Deutschland die Importabhängigkeiten aus nicht-EU-Ländern bis 2030 auf 65% reduzieren.

Der Ukrainekrieg war ein Augenöffner für die deutsche Industrie. Deutschland ist weltweit der drittgrößte Importeur von Nickelmetall.

Vor 2022 stammten 42% des importierten Raffinadennickels aus Russland, gefolgt von Norwegen mit 12% (BGR 2023). Nach dem Angriff auf die Ukraine im Februar 2022 drohte die EU mit Sanktionen auf russische Metallexporte einschließlich Nickel. Die deutschen Nickelindustrie war kurzfristig gezwungen, andere Rohstoffquellen zu suchen. Die Nickelraffinerie Glencore in Kristiansand in Norwegen konnte kurzfristig einen Anteil von >50% der russischen Importe übernehmen. Glencore veredelte Nickelerze in Kristiansand aus firmeneigenen Nickelgruben in Sudbury, Kanada.

Neben Nickel importiert Deutschland seit vielen Jahren Konzentrate und Zwischenprodukte kritischer Rohstoffe aus Skandinavien, darunter Kupfer und Selen aus Schweden, Kobalt aus Finnland sowie Silizium und Titan aus Norwegen. Da Skandinavien über zahlreiche Lagerstätten und Ressourcen kritischer Rohstoffe verfügt, könnte der Ausbau des Rohstoffhandels und die Etablierung strategischer Partnerschaften mit den skandinavischen Ländern der Schlüssel zur Diversifizierung der Versorgung mit diesen Rohstoffen sein. Im Folgenden wird die Situation der Rohstoffe in Norwegen, Schweden und Finnland dargestellt, um das Potenzial für Importdiversifizierungen und Partnerschaften aufzuzeigen.

Rohstoff	2022 Tonnage (t)	2023 Tonnage (t)	Exporteur	Importanteil (%)
Bauxit (Aluminiumerz)	2.681.732	1.104.468	Guinea	91,7
Anodenkupfer (nicht raffiniert)	91.187	6.064	Bulgarien	89,5
Magnesiumschrotte	18.275	17.190	China	66,0
Magnesiumrohformen (>= 99,8% Mg)	23.224	14.687	China	79,1
Ferronickellegierungen	10.452	12.733	Niederlande	75,1
Kobaltoxid/hydroxid	1.292	1.117	Finnland	83,5
Niob-Tantal-Schlacken	4.770	5.092	Thailand	69,4
Polysilizium (>=99,99% Si)	5.098	2.356	USA	87,1
Titanschlacken	-	4	Norwegen	100,0
Vanadiumschrotte	-	1.010	Island	99,1
Vanadiumrohformen/pulver	12	4	Russland	89,5
Wolframate	1.778	1.404	k.A.	96,8
Wolframoxide/hydroxide	222	338	k.A.	94,7
Wolframrohformen/gesintert	47	69	China	73,2
Antimonerze/konzentrate	3	11	Niederlande	95,2
Lithiumkarbonate	7.660	5.918	Chile	68,8
Selen	163	91	Schweden	66,0
Seltenerdmetalle	225	314	China	95,8
Wismut	1208	804	China	97,9
Nephelinsyenite (Feldspatrohstoff)	51.476	42.959	Norwegen	94,8
Phosphaterz	18.749	58.786	Niederlande	83,7

Tab. 1: Liste kritischer primärer Rohstoffe, die von Deutschland importiert werden mit einem Importanteil von >65% aus nur einem Land. k.A. – keine Angaben. Daten von BGR (2024a).

2 Skandinavien als wichtiger Exporteur kritischer Rohstoffe für Deutschland

Die skandinavischen Länder Finnland, Schweden und Norwegen sind traditionelle Bergbauländer mit einem großen Potenzial an Lagerstätten, insbesondere für die kritischen Rohstoffe Kobalt, Kupfer, Grafit, Hafnium, Lithium, Niobium, Platingruppenmetalle, Selen, Seltene Erden, Silizium, Tantal, Titan und Vanadium (Tabelle 2, Abbildung 1). Folgende Kriterien machen diese Länder attraktiv als Produzenten und Lieferanten kritischer Rohstoffe für Europa und Deutschland:

- Stabile politische Verhältnisse und klar definierte regulatorische Rahmenbedingungen
- Hohe Qualität sowie freier Zugang zu geologischen, geophysikalischen und geochemischen Datensätzen im Bereich der Länder-erkundung
- Aktive Unterstützung der Regierungen bei strategischen Rohstoffprojekten, insbesondere im Rahmen von Green-Deal-Initiativen (z. B. Batterierohstoffe)
- Relativ kurze Transportwege zu den europäischen Industriezentren
- Vorhandene Hochtechnologie-Aufbereitung für Aluminium, Silizium, Kupfer, Kobalt, Nickel und Platingruppenelemente.

In den folgenden Kapiteln wird näher auf die drei Länder eingegangen, insbesondere in Bezug auf die Produktion und Aufbereitung kritischer Rohstoffe sowie deren Export nach Deutschland. Einige bedeutende Rohstoffprojekte, die künftig im Bergbau realisiert werden könnten, werden ebenfalls beschrieben.

Kritischer Rohstoff	Bergbau- produktion (t)	Raffinerie- und Schmelzproduktion (t)	Ressourcen in Skandinavien (t)
Antimon	0	0	24.608
Beryllium	0	0	924
Bismuth	0	0	677
Kobalt	1.559	19.502	489.700
Fluorit	0	n.z.	3.988.170
Grafit	10.000	10.000	29.762.666
Hafnium	0	0	6.741
Kupfer	135.610	396.400	18.470.600
Lithium	0	0	78.040
Mangan	0	490.000	10.687.700
Nickel	41.429	183.005	7.636.000
Niobium	0	0	145.000
PGM	2.134	k.A.	857
Phosphor	182.620	n.z.	259.642.000
Seltene Er- den	0	0	874.000
Scandium	0	0	52.180

Silizium	170.000	240.000	28.822.600
Tantal	0	0	545
Titan	189.000	21.582	122.800.000
Wolfram	0	0	6.695
Vanadium	0	0	5.565.710

Tab. 2: Bergbau-, Raffinerie- und Schmelzproduktion kritischer Rohstoffe im Jahr 2020 sowie Ressourcen in den skandinavischen Ländern Norwegen, Schweden und Finnland. Für Grafit, Silizium und Titan sind Durchschnittswerte von Jahresproduktionen angegeben. PGM – Platingruppenmetalle; n.z. – nicht zu-treffend, k.A. – keine Angaben. Daten von Eilu et al. (2021).

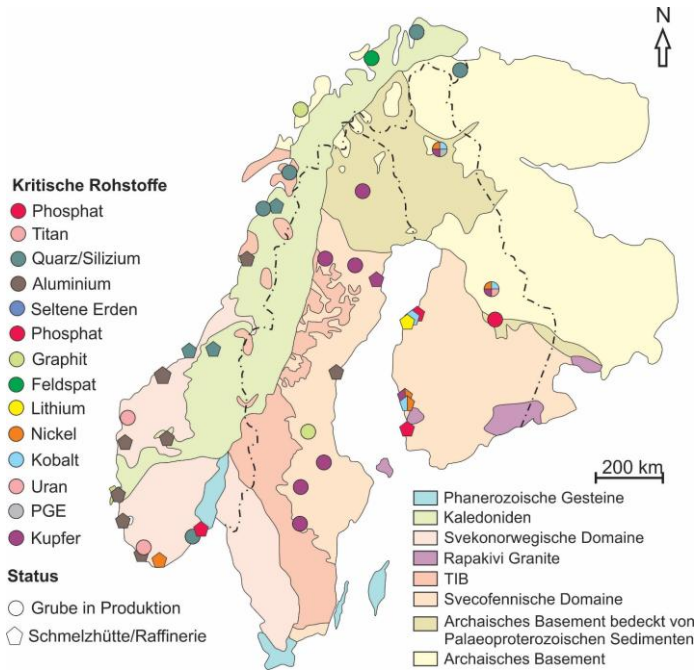


Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte Skandinaviens mit aktiven Gruben und Aufbereitungszentren (Schmelzhütten und Raffinerien) kritischer Rohstoffe in Norwegen, Schweden und Finnland. Daten von NGU (2024), Liljenstolpe et al. (2024), und MEAE (2021). TIB – Trans-Scandinavian Igneous Belt.

3 **Produktion und Projekte kritischer Rohstoffe in Norwegen**

Norwegen verfügt über bedeutende Vorkommen an kritischen Rohstoffen sowie eine gut etablierte Aufbereitungsindustrie, was das Land zu einem Schlüsselakteur in der globalen Lieferkette für diese Materialien macht. Besonders bekannt ist Norwegen für seine Ressourcen und die Produktion von Grafit, Titanmineralien, Aluminium, Silizium und Siliziumlegierungen (hergestellt aus Quarz) sowie Nickel (Abbildung 2). Derzeit gibt es zehn aktive Bergbauprojekte im Bereich kritischer Rohstoffe, einschließlich der Quarzrohstoffe, die als Ausgangsmaterial für die Siliziumherstellung dienen (Tabelle 3). Charakteristisch für Norwegen sind die zahlreichen Schmelzhütten und Raffinerien entlang der Küste (Abbildung 2). Das Land legt zudem großen Wert auf nachhaltige Praktiken im Bergbau und strebt an, bis 2030 eine emissionsfreie Bergbauindustrie zu etablieren.

Aktuelle Bergbauprojekte im Bereich kritischer Rohstoffe umfassen die Kupfervorkommen Nussir, Sulitjelma und Joma, die Seltene-Erden-Lagerstätte Fensfeltet, die Kupfer-Nickel-Kobalt-Mineralisierung Ertelen sowie das Phosphat(Apatit)-Vanadium-Titan-Vorkommen Bjerkreim (Tabelle 4). Fensfeltet ist die größte Seltene-Erden-Lagerstätte in Europa, und das Unternehmen Rare Earths Norway plant, ab 2030 Seltene Erden für den europäischen Markt zu produzieren.

Grube	Kritischer Rohstoff	Firma
Tellnes	Titan (Ilmenit), Kobalt als Nebenprodukt	Titania AS (Kronos)
Engebo	Titan (Rutil)	Nordic Mining ASA
Drag, Håkonhals	Quarz (Quarzglass)	The QuartzCorp Ltd.
Svanvik	Quarz (Quarzglass)	The QuartzCorp Ltd.
Tana	Quarz (Ferrosilizium, Silizium)	Elkem
Mårnes	Quarz (Ferrosilizium)	Elkem
Snekkevik	Quarz (Ferrosilikomangan)	Eramet
Trælen	Grafit	Norge Mining
Stjernøy	Nephelinsyenit (Feltspat)	Sibelco Norge

Tab. 3: Aktiver Bergbau kritischer Rohstoffe in Norwegen.

Projekt	Kritischer Rohstoff	Firma
Nussir	Kupfer	Nussir ASA
Sulitjelma	Kupfer	Nye Sulitjelma Gruver AS

Joma	Kupfer	Bluelake Mineral
Fen	Seltene Erden	Rare Earths Norway, REE Minerals
Nasafjell	Quarz	Elkem
Ertelien	Kupfer, Nickel, Kobalt	Kuniko AS
Bjerkreim	Phosphat (Apatit), Vanadium (Magnetit), Titan (Ilmenit)	Norge Mining

Tab. 4: Momentane Bergbauprojekte kritischer Rohstoffe in Norwegen.

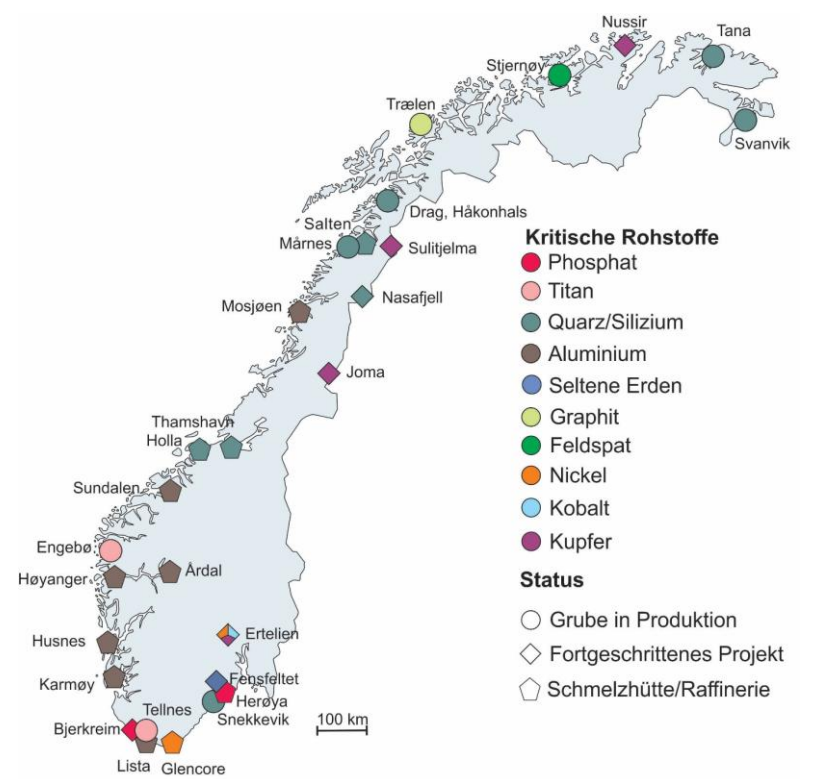


Abb. 2: Aktive Gruben, Schmelzhütten/Raffinerien und fortgeschrittene Bergbauprojekte kritischer Rohstoffe in Norwegen. Daten von NGU (2024).

Kritischer Rohstoff	Grube/Firma	Schmelz- und Raffineriehütte/Firma	Produktion	Export nach Deutschland
Grafit	Skaland/ Norge Mineraler Holding AS	-	ca. 10.000 t	ca. 9.000 t
Titan (Ilmenit)	Tellanes/ Titania AS (Kronos)	-	654.136 t (Ilmenit-konzentrat mit 44% TiO ₂)	ca. 108.000 t
Titanschlacke	-	INEOS Group Holdings S.A.	117.204 t	4 t
Silizium	Tana/Elkem Tana	Elkem Salten and Elkem Thamshaven,	147,394 t	ca. 42.000 t
	-	Wacker Chemical Holla	85.637 t	85.637 t
Nickel	-	Glenchore Nikkelverk	95.013 t	14.211 t
Kupfer	-	Glenchore Nikkelverk	20.086 t	4.785 t
Kobalt	-	Glenchore Nikkelverk	3.464 t	35 t
Platingruppenmetalle	-	Glenchore Nikkelverk	k.A.	357 kg Palladium
Nephelinsyenit (Feldspatrohstoff)	Stjernoy/ Sibelco Nordic AS	-	254.057 t	14.938 t

Tab. 5: Produktion und Produzenten mineralischer kritischer Rohstoffe in Norwegen und Exportdaten für Deutschland im Jahr 2023. Daten von BGR (2024a) und (2024b). k.A. – keine Angaben.

3.1 Grafit

Norwegen gehört zu den weltweit führenden Grafitproduzenten. Die Skaland-Grafitgrube auf der Insel Senja bei Tromsø ist die größte Grafitgrube Europas und ist seit 1917 in Betrieb. Skaland produziert jährlich etwa 10.000 t Grafitkonzentrat. Die aktualisierten Mineralressourcenschätzungen für die Untertagegrube Trælen belaufen sich auf 1,84 Mill. t mit einem Gesamtgrafitgehalt (TGC) von 23,6%. Im Jahr 2023 wurden etwa 9.000 t Grafitkonzentrat nach Deutschland exportiert (Tabelle 5).

3.2 Silizium

Silizium wird in Norwegen aus Quarziten durch das norwegisch-chinesische Unternehmen Elkem ASA in seinen beiden Schmelzhütten in Salten (Provinz Nordnorwegen) und Thamshavn (Provinz Trøndelag) sowie von dem deutschen Unternehmen Wacker Chemie AG am Standort

Holla (Provinz Trøndelag) produziert. Die Produktion in Holla dient ausschließlich der Versorgung deutscher Weiterverarbeitungsstandorte. Im Jahr 2023 stellte die Hütte in Holla 85.637 t Silizium her (Tabelle 5). Insgesamt wurden im Jahr 2023 rund 128.000 t Silizium aus Norwegen nach Deutschland exportiert, was etwa die Hälfte (55%) aller deutschen Siliziumimporte ausmachte. Der Gesamtimport von Silizium betrug im Jahr 2023 233.819 t, während er im Jahr 2022 noch bei 259.309 t lag. 16% des Imports kamen aus Frankreich und 14% aus Brasilien.

3.3 Titan

Titania AS in Hauge i Dalane produziert jährlich etwa 0,5 Mill. t Ilmenitkonzentrat. Ca. 25 Prozent werden an das Ilmenitwerk in Tyssedal, 20 Prozent an Kronos Titan AS in Fredrikstad und der Rest wird exportiert. Kronos produziert jährlich 30.000 t Titandioxidpigment. Titania und Kronos gehören dem amerikanischen Unternehmen Kronos International Ltd.

Im Jahr 2023 wurden 108.000 t Titankonzentrat (Ilmenitkonzentrat mit 44% TiO_2) aus Norwegen nach Deutschland importiert (Tabelle 5). Dies entspricht 36% des gesamten deutschen Imports von Titankonzentrat im Jahr 2023, der insgesamt 297.786 t betrug (im Jahr 2022 waren es noch 479.932 t). Wichtigster Importeur ist Südafrika mit einem Anteil von 41,1%. Umgerechnet auf reines Titanmetall, unter Berücksichtigung anderer Titanrohstoffe, beträgt der norwegische Importanteil 13%.

Der norwegische Produzent Norsk Titanium AS ist ein globaler Marktführer in der Herstellung von Titankomponenten für Flugzeuge. Als Reaktion auf den Ukrainekrieg schloss Airbus im April 2024 einen langfristigen Rahmenvertrag mit Norsk Titanium AS ab, um Titankomponenten für seine Flugzeuge in Norwegen fertigen zu lassen (aero.de 2024). Bis 2022 deckte Airbus seinen Materialbedarf zu 50% aus Russland. Das Metall steht nicht auf Sanktionslisten, dennoch strebt Airbus an, sich von russischen Titanlieferungen unabhängig zu machen und setzt verstärkt auf norwegisches Titan und Titanzwischenprodukte.

Seit Dezember 2024 produziert Nordic Mining am Engebøfjellet in Westnorwegen Rutilkonzentrat für die Herstellung von Titanoxidpigment.

3.4 Nickel, Kobalt, Kupfer und Platingruppenmetalle

In Norwegen wird in der Glencore Nickelraffinerie in Kristiansand hochreines Nickelkonzentrat aus importierter Nickelmatte, hauptsächlich aus Kanada und Finnland mit einem Nickelanteil von etwa 57%, produziert. Neben 95.013 t Nickel stellte die Raffinerie im Jahr 2023 auch 20.086 t Kupfer, 3.464 t Kobalt sowie geringere Mengen an Selen, Tellur, Bismut, Silber, Gold und Platingruppenmetallen her (Tabelle 5).

Das in der Raffinerie produzierte Nickel wird nahezu ausschließlich exportiert. Norwegen zählt zu den wichtigsten Lieferländern von Nickelmetall nach Deutschland und rangierte seit 2017 an zweiter Stelle der Exportländer. Im Jahr 2023 war Norwegen mit einem Anteil von etwa 29% sogar der bedeutendste Lieferant von Nickelmetall für Deutschland. Russland hatte im selben Jahr einen Anteil von 20% an den deutschen Nickelimporten, gefolgt von Australien mit 10,7%.

Deutschland war 2024 der viertgrößte Nickelverbraucher weltweit und der drittgrößte Importeur von Nickelmetall. Die wichtigsten Anwendungen für Nickelmetall sind nichtrostende Stähle und Nickellegierungen, die im Maschinenbau, in der Chemieindustrie sowie in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden. Die deutschen Importe aus Norwegen betrugen im Jahr 2023 14.211 t Nickelmetall (der Gesamtimport von Raffinadenickel lag 2023 bei 49.053 t, im Jahr 2022 bei 59.271 t). Darüber hinaus importierte Deutschland aus Norwegen 4.785 t Kathodenkupfer (das entspricht rund 1% der deutschen Gesamtimporte dieses Metalls), 35 t Kobalt (1,6% der deutschen Gesamtimporte) sowie 357 kg Palladium (0,6% der deutschen Gesamtimporte).

3.5 Nephelinsyenit (Feldspatrohstoff)

Nephelinsyenit ist ein Gestein, das reich an Nephelin und Alkalifeldspat ist und von der Firma Sibelco auf der Insel Stjernøy in Nordnorwegen abgebaut wird. Nephelinsyenit dient als Flussmittel in der Keramikindustrie. Im Jahr 2023 importierte Deutschland aus Norwegen 14.983 t Nephelinsyenit, was 50,1% des Gesamtimports von Feldspatrohstoffen entspricht (Tabelle 5).

4 **Produktion und Projekte kritischer Rohstoffe in Schweden**

Schweden ist einer der führenden Erz- und Metallproduzenten in der EU. Das Land ist mit Abstand der größte Eisenerzproduzent in der EU und gehört auch zu den führenden Produzenten von Kupfer und Gold. Die Mehrzahl der Bergwerke befindet sich in den drei Erzregionen Schwedens: Norrbotten, Skelleftefältet und Bergslagen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts gab es in Schweden etwa 250 Bergwerke. Heute ist die Zahl der aktiven Betriebe auf wenige gesunken (Tabelle 6), während die Gesamtproduktion mehr als verdoppelt wurde. Im Jahr 2021 erreichte die Erzproduktion mit 88,6 Mill. t den höchsten Wert aller Zeiten, verringerte sich jedoch im folgenden Jahr auf 84 Mill. t (Liljenstolpe et al. 2024). Die Erzproduktion folgt in hohem Maße dem Konjunkturzyklus.

Schweden verfügt über zahlreiche vielversprechende Bergbauprojekte, die sowohl die bestehende Kupfer- und Grafitproduktion erweitern als auch neue kritische Rohstoffe erschließen würden, darunter Seltene Erden (Norra Kärr, Olserum, Per Geijer, Malmberget, Häggån), Nickel (Rönnbäcken, Häggån), Phosphat (Malmberget, Per Geijer), Vanadium (Häggån) und Lithium (Bergby) (Abbildung 3; Tabelle 7).

Grube	Kritischer Rohstoff	Firma
Aitik	Kupfer	Boliden
Kristineberg	Kupfer	Boliden
Renström	Kupfer	Boliden
Garpenberg	Kupfer	Boliden
Zinkgruvan	Kupfer	Lundin Mining
Lovisagruvan	Kupfer	Boliden
Kringelgruvan (Woxna)	Grafit	Leading Edge Material Corp.

Tab. 6: Aktiver Bergbau kritischer Rohstoffe in Schweden.

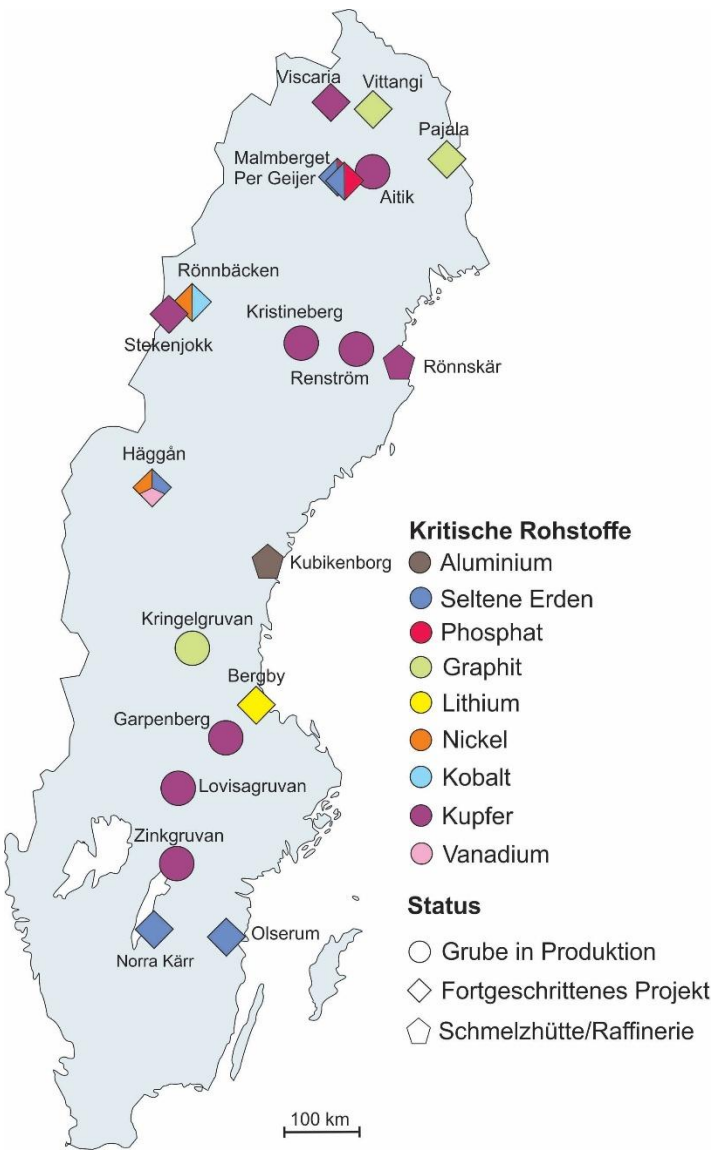


Abb. 3: Aktive Gruben, Schmelzhütten/Raffinerien und fortgeschrittene Bergbauprojekte kritischer Rohstoffe in Schweden. Daten von Liljenstolpe et al. (2024).

Projekt	Kritischer Rohstoff	Firma
Rönnbäcken	Nickel, Kobalt	Bluelake Mineral
Stekenjokk, Levi	Kupfer	Bluelake Mineral
Viscaria	Kupfer	Gruvaktiebolaget Viscaria
Häggån	Vanadium, Molybdän, Seltene Erden, Nickel	Aura Energy Ltd
Olserum	Seltene Erden	European Green Transition
Malmberget	Phosphat (Apatit), Seltene Erden	LKAB
Per Geijer	Phosphate (Apatite), Seltene Erden	LKAB
Norra Kärr	Seltene Erden	Leading Edge Materials Corp
Vittangi	Grafit	Talga Resources
Pajala	Grafit	European Green Transition
Bergby	Lithium	United Lithium

Tab. 7: Momentane Bergbauprojekte kritischer Rohstoffe in Schweden.

4.1 Kupfer

Die globale Kupferproduktion ist in den letzten fünf Jahren kontinuierlich gestiegen. Im Jahr 2023 betrug die Gesamtproduktion von Kupfer aus Minen weltweit 22,1 Mill. t. Chile ist der größte Kupferproduzent der Welt mit einem Anteil von 24%. Weitere bedeutende Produzenten sind Peru, China und die Demokratische Republik Kongo. Die Kupfergruben in Schweden tragen nur einen relativ kleinen Teil zur globalen Kupferproduktion bei – etwas über 0,3% – stellen jedoch 10% der europäischen Kupferproduktion dar. Deutschland importierte im Jahr 2023 68.000 t raffiniertes Kathodenkupfer aus Schweden (BGR 2024a).

4.2 Selen

Die Firma Boliden produziert Selen als Nebenprodukt der Kupfer-Zink-Blei-Produktion aus selenhaltigen Sulfiderzen im Gebiet Skelleftefältet. Im Jahr 2023 importierte Deutschland etwa 60 t Selenkonzentrat aus

Schweden (BGR 2024a). Damit ist Schweden der Hauptlieferant von Selen, gefolgt von Spanien mit einem Anteil von 66%.

5 Produktion und Projekte kritischer Rohstoffe in Finnland

Finnland zeichnet sich durch eine vielfältige und rohstoffreiche Geologie aus. Die finnische Bergbauindustrie, die die größte Goldmine der EU, die einzige Chromitmine, die größte Kobaltraffinerie und einen der am besten verwalteten sowie regulierten Explorationssektoren umfasst, spielt eine wichtige strategische Rolle für die Rohstoffversorgung und Unabhängigkeit der Europäischen Union.

Derzeit verfügt Finnland über acht aktive Metallgruben, darunter drei, die kritische Metalle abbauen (Tabelle 8, Abbildung 4), sowie mehrere fortgeschrittene Rohstoffprojekte, die in den kommenden Jahren in Betrieb genommen werden sollen (Tabelle 9). Dazu gehören das Sakkatti-Nickel-Vorkommen, das Keliber-Oy-Lithium-Projekt und das Sokli-Seltenen-Erden-Phosphat-Projekt.

Die Schlüsselminerale, auf die sich die Mineralstrategie Finnlands konzentriert, sind Kobalt, Nickel und Kupfer. Das Land kontrolliert beispielsweise fast 90% der europäischen Nickelproduktion sowie etwa 90% des Kobalt-Raffineriemarkts der EU. Kobalt ist besonders wichtig für Elektrofahrzeugbatterien und erneuerbare Energiesysteme, wodurch die zentrale Rolle Finnlands in der europäischen Lieferkette weiter verstärkt wird.

Vor kurzem wurde Finnland zudem zum einzigen Uranproduzenten der Union, der in den kommenden Jahren voraussichtlich etwa die Hälfte des für die Kernkraftwerke des Landes benötigten Urans liefern wird (Dalton 2023).

Das Keliber-Oy-Lithiumprojekt hat sich zum Ziel gesetzt, der erste integrierte Lithiumhydroxid-Produzent in der EU zu werden und direkt die europäischen Lithiumbatteriehersteller zu beliefern. Das Projekt umfasst sieben Lithiumvorkommen, eine Aufbereitungsanlage sowie eine Lithiumraffinerie. Die Bergwerke befinden sich in Syväjärvi, Rapasaari, Länttä und Outovesi. Das abgebaute Lithiumerz wird in der Aufbereitungsanlage in Kaustinen verarbeitet und anschließend zur Lithiumraffinerie in Kokkola transportiert. Die Lithiumraffinerie soll in der zweiten

Hälfte des Jahres 2025 mit der Produktion beginnen, während die Aufbereitungsanlage im Jahr 2026 in Betrieb genommen werden soll (European Investment Bank 2024).

Der einzige kritische Rohstoff, den Deutschland derzeit aus Finnland bezieht, ist Kobalt. Im Jahr 2023 wurden 933 t Kobaltoxide und -hydroxide nach Deutschland importiert (BGR 2023a). Damit ist Finnland mit einem Anteil von 84% der Hauptimporteur von Kobalt für Deutschland.

Grube	Kritischer Rohstoff	Firma
Kevitsa	Nickel, Kupfer, PGE, Kobalt	Boliden Kevitsa Mining Oy
Sotkamo	Nickel, Kobalt, Kupfer	Terrafame Oy
Siilinjärvi	Phosphat	Yara Suomi Oy

Tab. 8: Aktiver Bergbau kritischer Rohstoffe in Finnland.

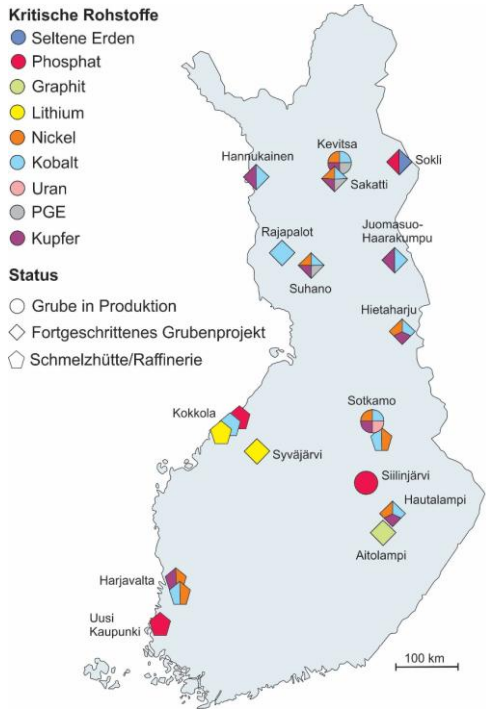


Abb. 4: Aktive Gruben, Schmelzhütten/Raffinerien und fortgeschrittene Bergbauprojekte kritischer Rohstoffe in Finnland. Daten von MEAE (2021).

Projekt	Kritischer Rohstoff	Firma
Hautalampi	Kobalt, Nickel, Kupfer	FinnCobalt Oy
Hietaharju	Nickel, Kupfer, Kobalt, PGE	Sotkamo Silver Oy
Juomasuo-Haarakumpu	Kobalt, Kupfer	Latitude 66 Cobalt Oy
Rajapalot	Kobalt	Mawson Finland Ltd.
Sokli	Phosphat, Seltene Erden, Niobium, Kupfer	Sokli Oy
Sotkamo	Uran als Nebenprodukt	Terrafame Oy
Sakatti	PGE, Kupfer, Nickel, Kobalt	AA Sakatti Mining Oy
Syväjärvi	Lithium	Keliber Oy
Hannukainen	Kupfer, Kobalt	Hannukainen Mining Oy
Suhano	PGE, Nickel, Kupfer, Kobalt	Suhanko Arctic Platinum Oy
Rapasaaret, Emmes, Outovesi, Länttä	Lithium	Keliber Oy
Aitolampi	Grafit	Grafintec

Tab. 9: Momentane Bergbauprojekte kritischer Rohstoffe in Finnland.

6 Deutschlands risikobehaftete Importabhängigkeiten von kritischen Rohstoffen

Der Industrie- und Hightech-Standort Deutschland ist auf eine sichere und nachhaltige Rohstoffversorgung angewiesen. Die Verantwortung für die Sicherstellung der Rohstoffversorgung liegt hauptsächlich bei der Wirtschaft, während die Politik dafür zuständig ist, die Rahmenbedingungen für eine verlässliche Rohstoffversorgung zu schaffen.

Im Folgenden werden die Importdaten kritischer Rohstoffe diskutiert, bei denen der Importanteil über 65% aus einem nicht-europäischen Land stammt. Dazu gehören die Rohstoffe Bauxit, Magnesium, Niobium-Tantal, Polysilizium, Vanadium, Wolfram, Lithium, Seltene Erden und Wismut (Tab. 1). Diese Daten werden im Hinblick auf die Diversi-

fizierung der Importländer analysiert, wobei skandinavische Länder besonders berücksichtigt werden. Die im Kapitel genannten Importzahlen stammen aus „Deutschland – Rohstoffsituation 2023“ (BGR 2024a).

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass bereits Importabhängigkeiten von über 33% von Nicht-EU-Ländern in Bezug auf die Diversifizierung evaluiert werden sollten. Auch in diesen Fällen bieten sich die skandinavischen Länder als alternative Importpartner für eine Reihe kritischer Rohstoffe an (Tabellen 3, 6, 8).

6.1 Bauxit

Die Produktion von Aluminiumraffinate in Deutschland lag im Jahr 2023 bei etwa 660.000 t (ohne Umschmelzaluminium) (BGR 2024a). Davon stammten über 40% aus Primärrohstoffen. Der dafür benötigte Bauxit wurde zu 92% aus Guinea importiert, was 1.104.468 t Bauxit-Erz entspricht (BGR 2024a). Damit ist die deutsche Aluminiumproduktion stark von einem politisch instabilen Entwicklungsland in Westafrika abhängig.

Skandinavien verfügt über keine Aluminiumvorkommen vom Bauxit-Typ. Norwegen ist, ähnlich wie Deutschland, ein bedeutender Aluminiumproduzent mit 1,3 Mill. t im Jahr 2024. Norsk Hydro, der führende norwegische Aluminiumproduzent, bezieht seinen Primärrohstoff hauptsächlich aus firmeneigenen Bauxitgruben in Brasilien. Die von Präsident Donald Trump Anfang 2025 eingeführten 25% Zölle auf Aluminium haben Norsk Hydro stark getroffen, da die USA ein Hauptabnehmer des in Norwegen produzierten Aluminiums sind.

Im Falle einer Störung der deutschen Bauxitlieferkette könnte Deutschland theoretisch raffiniertes Aluminium aus Norwegen beziehen, um die Versorgung der deutschen Autoindustrie und anderer Branchen mit Aluminium zu sichern. Norsk Hydro betreibt bereits 22 Standorte in Deutschland unter der Hydro Aluminium Deutschland GmbH.

6.2 Magnesium

Im Jahr 2023 importierte Deutschland rund 25.280 t Rohmagnesium. Ein Großteil davon, etwa 70%, stammt aus China. Mit einem Anteil von etwa 16% belegten die Niederlande den zweiten Platz in der Rangliste, während Österreich mit knapp 9% den dritten Platz erreichte. Deutschland ist besonders stark von den Magnesiumexporten aus China abhängig, und es scheint derzeit schwierig zu sein, diese Abhängigkeit durch

Importe aus anderen Ländern auszugleichen. Die skandinavischen Länder verfügen über keine aktiven Magnesiumgruben oder -projekte.

6.3 Niobium-Tantal

Niobium-Tantal wird in Deutschland überwiegend aus Schlacken, Aschen und Rückständen gewonnen. Im Jahr 2023 wurden 5.092 t dieses Rohmaterials importiert, wobei 69% aus Thailand und 27% aus Malaysia stammen. Generell sollte hier eine Diversifizierung mit Niobium-Tantal produzierenden Ländern, wie Brasilien, möglich sein.

Momentan wird in Skandinavien kein Niobium oder Tantal produziert. Es gibt jedoch große Niobium-Reserven in Finnland (123.000 t) und Norwegen (22.000 t) (Tabelle 2). Die Sokli-Phosphatlagerstätte enthält neben Seltenen Erden bedeutende Niobiumvorkommen. In Norwegen ist der Fensfelltet-Karbonatitkomplex die wichtigste Niobiumlagerstätte, in der bereits in den 1960er Jahren Niobium abgebaut wurde.

6.4 Polysilizium

Die Rohsilizium-Importe beliefen sich im Jahr 2023 auf 233.819 t, wobei 55% der Siliziumeinfuhren aus Norwegen stammen. Weitere 16% kommen aus Frankreich; beide Länder zeichnen sich durch ein geringes politisches Risiko aus. Die Lieferketten nach Deutschland, die für die Halbleiterindustrie wichtige Rohstoffe bereitstellen, sind relativ kurz und sicher. In Anbetracht des Aufbaus der Halbleiterproduktion in Deutschland sind dies hervorragende Voraussetzungen.

Zusätzlich wurden im Jahr 2023 2.356 t Polysilizium importiert, das hauptsächlich zur Herstellung von Solarzellen verwendet wird. Die USA haben daran einen Anteil von 87%. Hier sollte eine Diversifizierung in Betracht gezogen werden, auch wenn die Importmengen im Vergleich zum Rohsilizium relativ gering sind.

Die Renewable Energy Corporation (REC) Group hat in Norwegen bis Ende 2023 Polysilizium produziert, die Produktion jedoch aufgrund zu hoher Energiekosten eingestellt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass REC seine Produktionsstätten in Kristiansand und Porsgrunn wieder aktiviert. In diesem Fall könnte Norwegen ein alternativer Polysilizium-Lieferant für Deutschland werden.

6.5 Vanadium

Vanadium wird überwiegend als Legierungsmetall in der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt. Bei der Stahlherstellung kommt meist Ferrovanadium zum Einsatz. Die Importtonnage von Ferrovanadium betrug im Jahr 2023 3.311 t, wobei der Großteil, etwa 45%, aus Österreich stammt. Vanadiumhaltige Abfälle und Schrotte (1.010 t) wurden 2023 zu 99% aus Island importiert. Rohvanadium (4 t) wurde zu 89% aus Russland bezogen. Da der Anteil des Rohvanadiums im Vergleich zu Ferrovanadium und Vanadiumschrotten sehr gering ist, spielt die Diversifizierung in diesem Fall eine untergeordnete Rolle.

Norwegen und Schweden verfügen über umfangreiche Vanadium-Ressourcen (Tabelle 2). In Schweden handelt es sich beispielsweise um das Häggån-Projekt von Aura Energy Ltd (Tabelle 7), während in Norwegen das Bjerkreim-Phosphat-Vanadium-Titan-Vorkommen relevant ist (Tabelle 4). Hier besteht die Möglichkeit, dass Deutschland an der Entwicklung und Erschließung dieser Ressourcen beteiligt wird.

6.6 Wolfram

Wolfram wird hauptsächlich in Form von Abfällen und Schrotten importiert. Im Jahr 2023 belief sich die Tonnage auf 5.454 t, wobei Italien und Österreich die Hauptlieferanten sind. Wolframate (1.404 t) und Wolframoxide/hydroxide (338 t) werden zu 97% bzw. 95% aus jeweils einem nicht näher definierten Land importiert (Tab. 1). Wolframrohformen (69 t) stammen zu 73% aus China. Obwohl der Anteil an Wolframrohformen gering ist, sollte auch hier eine Diversifizierung in Betracht gezogen werden.

Die skandinavischen Länder verfügen über nur geringe Wolframreserven (7.500 t; Tabelle 2), und es ist unwahrscheinlich, dass diese in den nächsten Jahren erschlossen werden. Mit Österreich gibt es jedoch einen wichtigen Wolframproduzenten in Europa, von dem Deutschland zusätzlich Wolfram beziehen könnte.

6.7 Lithium

Im Jahr 2023 wurden 5.918 t Lithiumcarbonat nach Deutschland importiert. Chile ist hierbei mit einem Anteil von 69% der Hauptlieferant, gefolgt von den USA mit 14% auf dem zweiten Platz. Dieser Rohstoff gewinnt zunehmend an Bedeutung, da er ein zentraler Bestandteil von

Batterien und Brennstoffzellen ist. Langfristig sollte Deutschland eine Diversifizierung der Lithiumimporte anstreben, insbesondere im Hinblick auf die geplante Herstellung von Lithiumcarbonat und -hydroxid in Finnland ab 2026.

6.8 Wismut

Im Jahr 2023 wurden 804 t Wismut importiert, wobei 98% aus China stammen. In Skandinavien gibt es keine nennenswerten Wismutressourcen. Generell wird es schwierig sein, eine Diversifizierung der Importe für diesen Rohstoff zu erreichen.

6.9 Seltene Erden

Im Jahr 2023 importierte Deutschland insgesamt 314,4 t Seltene Erden. Im Vergleich zum Vorjahr stieg die Importmenge um etwa 89 t. China war im Jahr 2023 der weltweit größte Produzent von Seltenen Erden und dominierte als Herkunftsland mit einem Anteil von knapp 96% an den deutschen Importen. Österreich belegte mit 3,5% den zweiten Platz in diesem Ranking. Seltene Erden werden hauptsächlich in Magneten für Windturbinen und andere Motortypen eingesetzt und sind somit essenzielle Rohstoffe für die Energie- und Mobilitätswende.

Skandinavien verfügt über mehrere Projekte zur Förderung von Seltenen Erden, allen voran die Fensfeltet-Lagerstätte in Südnorwegen, die größte Seltene-Erden-Lagerstätte in Europa. Die Firma Rare Earths Norway plant, ab 2030 Seltene Erden für den europäischen Markt zu produzieren. Weitere Projekte zur Erschließung von Seltenen Erden sind Norra Kärr, Per Geijer, Malmberget, Olserum und Häggån in Schweden (Tabelle 7) sowie Sokli in Finnland (Tabelle 9). Sollte die deutsche Industrie daran interessiert sein, ihre Importe von Seltenen Erden langfristig auszubauen, sollte sie sich an der Entwicklung dieser Projekte beteiligen oder Partnerschaften eingehen.

7 Ausblick – Die skandinavischen Länder als zuverlässiger Rohstoffpartner

Die COVID-19-Pandemie sowie der russische Angriffskrieg in der Ukraine haben die Vulnerabilitäten der globalen Lieferketten offengelegt

und eine breite Diskussion über die Versorgung der Wirtschaft mit essenziellen Rohstoffen und Vorprodukten ausgelöst. Die von der EU geplante Dekarbonisierung der europäischen Wirtschaft und gesellschaftlichen Energienutzung führt zu einem steigenden Bedarf an Rohstoffen, insbesondere im Hinblick auf die ambitionierten Ziele der Verkehrswende und der Energiewende. Dieser zusätzliche Bedarf wird trotz gesteigerten Recyclings überwiegend mit Primärrohstoffen gedeckt werden müssen. Vor diesem Hintergrund werden Rohstoffe wie Kupfer, Nickel, Kobalt, Seltene Erden, Lithium und Grafit weiterhin sowohl in der Exploration und Gewinnung als auch auf der Nachfrageseite mittel- bis langfristig anhaltende Aufmerksamkeit erfahren.

Der veränderte Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien, insbesondere der Bedarf an Hochtechnologiemetallen, der Einfluss von Spekulation auf den Rohstoffmärkten, die zuletzt zunehmenden Wettbewerbsverzerrungen im Handel sowie die teilweise hohe Konzentration der weltweiten Bergwerksförderung und Raffinadeproduktion auf nur wenige, teils politisch instabile Länder und Unternehmen stellen die von Importen abhängige deutsche Wirtschaft vor große Herausforderungen. Daher spielen das Recycling und die Gewinnung heimischer Rohstoffe eine zunehmend wichtigere Rolle, um die Importabhängigkeit zu verringern und eine zuverlässige Versorgung der deutschen Wirtschaft zu gewährleisten. Nichtsdestotrotz ist die Diversifizierung der Rohstoffimportländer oft schneller und einfacher umsetzbar. Daher stellt sie häufig die erste effektive Maßnahme dar, um die Rohstoffversorgung sicherer und nachhaltiger zu gestalten. Die jüngere Geschichte zeigt, dass zahlreiche Möglichkeiten zur Diversifizierung ungenutzt bleiben, bis zu dem Zeitpunkt da akuter Handlungsbedarf besteht, wie im Fall der Nickelimporte aus Russland, die kurzfristig hauptsächlich von Norwegen abgedeckt werden konnten. Zudem ist die Importdiversifizierung eine Vorgabe des CRMA der EU, zu der auch Deutschland verpflichtet ist.

Die skandinavischen Länder Norwegen, Schweden und Finnland verfügen über langjährige Erfahrungen im Bergbau und der Rohstoffaufbereitung. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten der Region besteht zudem ein hohes Potenzial für kritische Rohstoffe wie Seltene Erden, Lithium, Grafit, Vanadium, Phosphate und andere. Finnland und Schweden planen, ihre Kupfer-, Kobalt- und Nickelproduktion auszubauen, während Norwegen sich hauptsächlich auf die Produktion von Titan, Grafit, Aluminium und Silizium konzentriert.

Die skandinavischen Länder sind auf dem Weg, die Grundlage für transformative Veränderungen in den globalen Lieferketten kritischer Rohstoffe zu schaffen. Die politische Stabilität Skandinaviens und seine strategische Lage innerhalb der EU erhöhen die Attraktivität für Bergbauinvestitionen und als Rohstofflieferant. Durch proaktive Regierungsrichtlinien, strategische Partnerschaften und ein Engagement für nachhaltige Exploration und Abbau etablieren sich die skandinavischen Länder als Vorreiter in der Produktion kritischer Rohstoffe.

Viele Faktoren sprechen für eine verantwortungsvolle Produktion, darunter Bildung, Sicherheit und Umweltaspekte, die in modernen skandinavischen Bergwerken und Produktionsketten besonders gut berücksichtigt werden. Es wird großer Wert auf die Kompetenz und das Wohlergehen der Arbeiter gelegt, und die Perspektive der Unterstützung der Biodiversität wird bereits in die Planungsphasen von Bergbau- und Verarbeitungsprojekten integriert. Diese Aktivitäten sowie die enge Zusammenarbeit mit Einrichtungen wie den Geologischen Diensten (NGU, SGU, GTK) und Partnerschaften mit internationalen Unternehmen unterstreichen das Engagement der skandinavischen Länder für einen nachhaltigen Bergbau.

Die Hauptschwierigkeit besteht jedoch in den hohen Energiekosten, die sich auf die Rohstoffpreise auswirken. Dies ist nach wie vor der Hauptgrund, warum Unternehmer häufig billigere Rohstoffe aus Entwicklungsländern beziehen, obwohl diese mit Risiken verbunden sind.

Die skandinavischen Länder können erheblich dazu beitragen, die deutschen Importe kritischer Rohstoffe zu diversifizieren. Für Deutschland könnte es lukrativ sein, seine Importe von Nickel, Kobalt, Kupfer und Silizium aus Skandinavien weiter auszubauen. Der Import von Rohaluminium sollte ebenfalls in Betracht gezogen werden. Deutschland sollte sich an der Entwicklung von Seltenen Erden und Lithiumvorkommen in Skandinavien beteiligen oder Partnerschaften eingehen, um langfristig Zugang zu diesen wichtigen Rohstoffen für Zukunftstechnologien zu erhalten.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Henrik Schiellerup vom Norwegischen Geologischen Dienst (NGU), Martiya Sadeghi vom Schwedischen Geologischen Dienst (SGU) und Juha Kaija Juha vom Finnischen Geologischen Dienst (GTK) für die Bereitstellung von Informationen. Der Dank gilt ebenfalls Christoph Hilgers für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts.

Bibliographie

- aero.de (2024) *Airbus ersetzt Titan aus Russland*. 16. April 2024. <https://www.aero.de/news-47283/Airbus-bezieht-Titan-aus-Norwegen.html>.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): „Deutschland – Rohstoffsituation 2022.“ Hannover. 210 S. <https://doi.org/10.25928/dero-si22>.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2024a): „Deutschland – Rohstoffsituation 2023“. Hannover. 214 S. <https://doi.org/10.25928/dero-si23>.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2024b): „Norwegen – Die Bedeutung Norwegens für die Versorgung der Bundesrepublik Deutschland mit Erdöl, Erdgas und mineralischen Rohstoffen. Hannover. 96 S. <https://doi.org/10.25928/3f6m-ma24>.
- Dalton, David (2023): *Finland / State company plans uranium recovery for use in nuclear power plants*. 3 January 2023. <https://www.nucnet.org/news/state-company-plans-uranium-recovery-for-use-in-nuclear-power-plants-1-2-2023>.
- Eilu, Pasi / Bjerkgård, Terje / Franzson, Hjalti / Gautneb, Håvard / Häkkinen, Tuulia / Jonsson, Eirik / Keiding, Jakob Kløve / Pokki, Jussi / Raaness, Agnes / Reginiussen, Helge / Róbertsdóttir, Bryndis G. / Rosa, Diogo / Sadeghi, Martiya / Sandstad, Jan Sverre / Stendal, Henrik / Þórhallsson, Eyþór R. / Törmänen, Tuomo (2021): „The Nordic supply potential of critical metals and minerals for a Green Energy Transition.“ Nordic Innovation Report.

<https://www.nordicinnovation.org/2021/nordic-supply-potential-critical-metals-and-minerals-green-energy-transition>.

European Investment Bank (2024): *Finland: EU and Sibanye-Stillwater, through its Keliber lithium project, join forces in €150 million deal to improve EU access to and resilience in battery materials*. 23 August 2024.

<https://www.eib.org/en/press/all/2024-313-eu-and-sibanye-stillwater-through-its-keliber-lithium-project-in-finland-join-forces-in-eur150-million-deal-to-improve-eu-access-to-and-resilience-in-battery-materials>.

Liljenstolpe, Carolina / Hamberg, Roger / Hedström, Jerry / Larsson, Daniel / Kjellson, Helena (2024): „Statistics of the Swedish Mining Industry 2023”. Geological Survey of Sweden. 61 S.

<https://www.sgu.se/globalassets/produkter/publikationer/2024/statistics-of-the-swedish-mining-industry-2023---sgu-2024-1.pdf>.

MEAE - Ministry of Economic Affairs and Employment Enterprises (2021): „National Battery Strategy 2025”. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment Enterprises 2021, 6.

https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162685/TEM_2021_6.pdf.

Verzeichnis der Autorinnen und Autoren

Olaf Alisch (*1959) ist seit 2007 Geschäftsführer des Verbandes Bergbau, Geologie und Umwelt e.V., der als bundesweit führender Interessenvertreter seiner Mitgliedsunternehmen in den Bereichen Bergbau, Rohstoffgewinnung, Geotechnik und Umweltschutz agiert. Er ist Mitglied des Vorstandes der Initiative zur Förderung der Rohstoffkultur „RohstoffWissen!“, kooptiertes Beiratsmitglied im Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler (BDG) sowie im Bündnisnetzwerk Recomine-Rethinking Resources im Erzgebirge in Freiberg. Zusätzlich sitzt er im Forschungsbeirat des Zentrums Nachbergbau an der Technischen Hochschule Georgius Agricola in Bochum und ist Mitglied im Bergbauverein Rüdersdorf 1990 e.V. Nach seinem Studium an der Bergakademie Freiberg, das er als Diplom-Geologe mit der Spezialisierung auf Erdöl-Erdgas abschloss, arbeitete er von 1985 bis 1990 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentralen Geologischen Institut in Berlin in der Abteilung Erdöl-Erdgas. Nach der Wiedervereinigung war er geschäftsführender Gesellschafter in einem Ingenieurbüro im Bereich Steine und Erden. Ab 2000 folgte ein dreijähriger Lehrauftrag mit dem Thema „Spezielle Umweltprobleme der Rohstoffwirtschaft“ an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus. Zwischen 2002 und 2003 war er befristet als Mitarbeiter im Bereich Rechtsamswesen sowie für Betriebsplanungen und Planfeststellungen am Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg in Cottbus tätig.

o.alisch.geologe@googlemail.com

Andreas Börner (*1966) ist seit 2002 beim Geologischen Dienst im Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie in Mecklenburg-Vorpommern angestellt. Er wirkt als beigeordneter Dezernent für Oberflächengeologie (Quartär) und seit 2005 auch für Rohstoffgeologie. Seine

Arbeits- und Forschungsgebiete umfassen die Kartierung der Quartärgeologie, die geologische Begleitung großer Trassenaufschlüsse sowie die Rohstofferkundung und -kartierung in Mecklenburg-Vorpommern. Nach einer Ausbildung zum Maschinen- und Anlagenmonteur mit Abitur studierte er von 1990 bis 1995 Physische Geographie an der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB). Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen des Projekts „Untersuchungen an Bohrungen im Eberswalder Urstromtal“ an der Universität. Im Jahr 2007 promovierte er mit der Dissertation „Zur quartären Genese des Eberswalder Urstromtals“.

andreas.boerner@lung.mv-regierung.de

Reinhard O. Greiling (*1949 / MLS) studierte Geologie-Paläontologie an der Philipps Universität Marburg (Diplom) und Angewandte Geologie an der Freien Universität Berlin (Promotion). Die Habilitation erfolgte an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz. Von 1988 bis 2007 war er Professor für Strukturgeologie und Tektonophysik an der Ruprecht-Karls-Universität in Heidelberg. Seit 2007 leitete er den Lehrstuhl für Strukturgeologie und Tektonophysik im Institut für Angewandte Geowissenschaften des Karlsruhe Institute of Technology und ist dort seit 2014 Professor emeritus. Gastaufenthalte führten ihn u. a. an die Universitäten Cardiff, Cambridge, Jerusalem (Hebrew University) sowie Krakow. Seine Forschungsinteressen umfassen bzw. umfassten unter anderen Strukturen in Falten- und Überschiebungsgürteln, die Bildung von Vorlandbecken an Gebirgen, der Aufstieg von Hochdruck-Gesteinen sowie Methoden zur Quantifizierung der Deformation, vor allem AMS („magnetisches Gefüge“) sowie FEMR. Seit 2010 ist Reinhard O. Greiling Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

reinhard.greiling@kit.edu

Gerda Haßler (*1953 / MLS) studierte Romanistik und Slavistik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und erwarb dort 1974 das Diplom. Danach war sie wissenschaftliche Assistentin an den Wissenschaftsbereichen Allgemeine Sprachwissenschaft und Slavistik. 1978 promovierte sie mit einer Arbeit zu Sprachtheorien der Aufklärung. Nach einem postgradualen Studium an der Lomonosov-Universität Moskau und dreijähriger Tätigkeit an der Pädagogischen Hochschule

Zwickau, nahm sie 1982 eine B-Aspirantur an der Martin-Luther-Universität auf und habilitierte sich 1984 mit einer Arbeit zur Entwicklung des semantischen Wertbegriffs vom 18. bis zum 20. Jahrhundert. Nach einer Tätigkeit als Hochschuldozentin an der Universität Halle und einem Ruf an die Technische Universität Dresden war sie von 1993 bis 2020 Universitätsprofessorin für Linguistik und angewandte Sprachwissenschaft (Romanistik) an der Universität Potsdam. Sie war sechs Jahre Prorektorin ihrer Universität. Sie ist Autorin von 7 Monographien, Herausgeberin von 24 Sammelbänden und über 400 wissenschaftlichen Artikeln. Ihre Forschungsschwerpunkte sind funktionale Grammatik und Pragmatik der romanischen Sprachen, Geschichte der Sprachwissenschaft und des Sprachbewusstseins vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart, Diskurstraditionen und ihre Ausprägung in Kollokationen und Begriffsformationen. Seit 2018 ist Gerda Haßler Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin und seit 2021 deren Präsidentin.

gerda.hassler@uni-potsdam.de

Rainer Herd (*1963) ist Leiter des Lehrstuhls Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU). Er studierte Geologie an der Technischen Universität Darmstadt (TUD) und im Zweitstudium Geophysik an der Universität Frankfurt/Main. Nach dem Diplom in Geologie arbeitete er als Explorationsgeologe in Europa, Mittelamerika, West- und Ostafrika bevor er den wissenschaftlichen Weg einschlug und mit einer rohstoffgeologischen Arbeit über Ostsibirien promovierte. Nach einer Juniorprofessur wurde er 2009 Leiter des Lehrstuhls Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft. Seine wissenschaftlichen Interessen liegen u.a. im Bereich der Entwicklung von Rohstofferkundungskonzepten und der Weiterentwicklung von Erkundungsmethoden.

herd@B-TU.de

Christoph Hilgers (*1968 / MLS) leitet den Lehrstuhl für Strukturgeologie und Tektonik und ist wissenschaftlicher Sprecher des Zentrums Klima & Umwelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seine Interessen sind Energiesysteme, Rohstoffeffizienz, Vorhersage von Reservoir-Qualitäten, transnationale Hochschulbildung sowie Prozess- und strategische Analysen. Nach dem Studium der Geologie an der Rheinisch-

Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) und der Angewandten Strukturgeologie & Gesteinsmechanik am Imperial College London arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent an der RWTH, von wo aus er an das Werkzeugmaschinenlabor (WZL), Qualitätsmanagement & Fertigungsmesstechnik wechselte. Dort entwickelte er die GUtech als Teil der OES LLC, die er anschließend in Muskat, Oman, aufbaute und leitete. Vor seinem Ruf an das KIT war er Professor für Reservoir-Petrologie an der RWTH. Er ist Mitglied verschiedener professioneller und interdisziplinärer Initiativen wie dem ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien, RohstoffWissen e.V., der wissenschaftlichen Gesellschaft für die Up- und Downstream Industrie DGMK e.V. und Vorsitzender des Berufsverbands Deutscher Geowissenschaften BDG e.V. Seit 2024 ist Christoph Hilgers Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

christoph.hilgers@kit.edu

Jochen Kolb (*1969) ist Professor für Geochemie und Lagerstättenkunde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und leitet die Technologie Transfereinheit Analytik und Rohstoffe im KIT Campus Transfer. Er verfügt über mehr als 25 Jahre Erfahrung in verschiedenen Aspekten der wirtschaftsgeologischen Forschung, einschließlich kritischer Rohstoffe, Metallgewinnung aus Wasser und ökologischer sowie gesellschaftlicher Aspekte des Bergbaus. Seit 2016 arbeitet er in Projekten zur Geochemie unterschiedlicher Geothermalwässer und zu Methoden der Lithiumextraktion im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken. Nach dem Studium an der Goethe Universität in Frankfurt am Main wechselte er für die Promotion und eine wissenschaftliche Assistenz an die Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH), wo er im Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre habilitierte. Vor seinem Ruf ans KIT war er 10 Jahre erst als Wissenschaftler und dann als Professor beim Geologischen Dienst von Dänemark und Grönland beschäftigt und war assoziierter Professor an der Universität Kopenhagen. Er war vier Jahre lang Sprecher des Lenkungsausschusses des THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“, ist Sprecher für Georessourcen am KIT-Zentrum Klima und Umwelt, Stellvertretender Vorsitzender des Berufsverbandes Deutscher Geowissenschaftler und Gründungsmitglied der wissenschaftlichen Sektion Energie & Rohstoffe FUTURE (Forschung und Technologie für Untergrund, Rohstoffe &

Energie) in der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologische Vereinigung (DGGV). Er ist darüber hinaus Mitglied verschiedener professioneller und interdisziplinärer Initiativen.

jochen.kolb@kit.edu

Uwe Lehmann (*1962), Dr. rer. nat., ist ein „Spezi“ – so nannte man zu DDR-Zeiten Absolventen der damaligen Spezialschulen. Als Hobbychemiker absolvierte er sein Abitur an der Spezialschule für Chemie & Physik an der ehemaligen TH Leuna-Merseburg. Um Chemie nicht nur im Labor zu praktizieren, studierte er zwischen 1982 und 1987 Mineralogie an der TU Bergakademie Freiberg und promovierte 1991 über tertiäre Vulkanite der Rhön. Erste Station im Berufsleben war ein Ingenieurbüro in Schneeberg, wo er sich mit fast allen Aspekten des damals boomenden Steine-Erden-Bergbaus in Sachsen und Böhmen beschäftigte. 1995 wechselte er in den öffentlichen Dienst und arbeitete bis 2004 zunächst als Leiter der Stelle für Gebietsgeologie in Plauen. Nach deren Auflösung wurde er als Referatsleiter Rohstoffgeologie an das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Freiberg berufen. Fachliche Tätigkeitsschwerpunkte sind seitdem die Suche und planerische Sicherung von Lagerstätten und Vorkommen der Steine & Erden sowie Erze & Spate. Die in den letzten Jahren verstärkten Bemühungen, sich wieder mehr auf eigene Lagerstätten zu fokussieren (z.B. durch verschiedene Rohstoff-Strategien) haben zu einer breiten Palette an Aufgaben geführt, denen sich *Uwe Lehmann* mit seinem Referat widmet.

uwe.lehmann2@smekul.sachsen.de

Mirko Martin (*1965) arbeitet seit 2008 für die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH in Halsbrücke und ist seit 2011 Projektleiter im Fachbereich Verfahrensentwicklung/Biotechnologie. Nach seinem Diplomabschluss in Chemie im Jahr 1994, bei dem er die Aluminiumnitrid-Synthese mittels Gasphasenverfahren an der TU Bergakademie Freiberg untersuchte, arbeitete er ein Jahr lang als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Dresden im Bereich der chemischen Analytik mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie. Von 1995 bis 1996 war er freier Mitarbeiter im chemisch-analytischen Labor Dr. Blasy & Dr. Busse GmbH in Chemnitz. Anschließend war er bis 1999 als Projektingenieur bei der TIS GmbH in Freiberg tätig. Zwischen 2000 und 2008 agierte *Mirko Martin* als Geschäftsführer des Ingenieurbüros alpha

Geoservice Gesellschaft für angewandte Geowissenschaften in Bobritzsch.

m.martin@geosfreiberg.de

Axel Müller (*1970 / MLS) ist Leiter des Norwegischen Zentrums für Mineralogie NORMIN am Naturkundemuseum der Universität Oslo in Norwegen. Nach Abschluss seiner Doktorarbeit an der Universität Göttingen über die Spurenelementchemie des Quarzes und seiner geologischen Anwendung im Jahre 2000, forschte er im Rahmen eines Marie Skłodowska-Curie Stipendiums über die Genese von Seltenen-Metall-Lagerstätten am Natural History Museum London. Von 2004 bis 2015 arbeitete er als Explorationsgeologe für den Geologischen Dienst von Norwegen und für ein Jahr für das Bergbau- und Aufbereitungsunternehmen The Quartz Corp in den USA. Seit 2015 ist er am Naturkundemuseum in Oslo tätig. Seine momentanen Forschungsinteressen gelten der Lagerstätten-Genese von kritischen Rohstoffen (Si, Li, Be, Sc, Ta, Seltenerdelemente), die unabdingbar für die Energiewende sind. Seit 2014 ist Axel Müller Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

a.b.mueller@nhm.uio.no

Jasemin A. Ölmez (*1992), ist wissenschaftliche Assistentin und promovierte am Lehrstuhl Strukturgeologie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Sie studierte zuvor Angewandte Geowissenschaften an der Technischen Universität Darmstadt (TUD). Ihre Interessen sind die Charakterisierung von Reservoireigenschaften, Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen, Diagenese, Petrographie und Petrophysik, sowie globale Entwicklungen im Bereich der kritischen und strategischen Rohstoffversorgung. Sie ist Mitglied in der Deutschen Geologischen Gesellschaft-Geologische Vereinigung (DGGV), der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG), dem Oberrheinischen Geologischen Verein (OGV) und der Mineralogical Society of America (MSA).

jasemin.oelmez@kit.edu

Gerhard Pfaff (*1953 / MLS) studierte von 1973 bis 1978 Chemie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) und promovierte dort 1983 mit

einer Arbeit im Bereich der Anorganischen Festkörperchemie. Anschließend war er als wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent am Fachbereich Chemie der FSU mit vielfältigen Lehrverpflichtungen auf dem Gebiet der anorganischen Chemie tätig. 1991 begann er seine Tätigkeit bei Merck in Darmstadt in der Pigmentforschung. Seit 1994 war er Leiter der Abteilung Produktentwicklung innerhalb der Forschung für Effektpigmente. 2006 übernahm er die Leitung der Pigmentforschung. Seit 1994 hält er Vorlesungen an der Technischen Universität Darmstadt (TUD), wo er sich 1997 am dortigen Fachbereich Chemie mit einer Arbeit über Erdalkalititanate und Eisenoxide habilitierte. 2008 wurde er zum apl. Professor an der TUD ernannt. Er ist Autor von mehr als 160 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und mehr als 70 Patenten. Seit 2018 ist Gerhard Pfaff Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin und seit 2019 deren Sekretar der Klasse für Naturwissenschaften und Technikwissenschaften.

pfaff.pigmente@gmx.de

Norbert Rethmann (*1939) übernahm 1969 das bislang ausschließlich lokal aufgestellte elterliche Fuhrunternehmen mit damals 12 Lastwagen und 28 Mitarbeitern, das im münsterländischen Selm unter anderem für die Müllabfuhr zuständig war. Zug um Zug erweiterte er das Angebot der Dienstleistungen, stieg 1977 in die Schlachtabfallverwertung ein und machte sich schon damals Gedanken, Abfälle besser zu nutzen als sie zu vergraben oder zu verbrennen. Durch diese Verwertungs- und Recycling-Gedanken wuchs das Unternehmen zu einem der größten Unternehmen in der Kreislaufwirtschaft in Europa. Heute besteht die Unternehmensgruppe aus den vier eigenständigen Sparten REMONDIS (Recycling), SARIA (Bio-Industrie), Rhenus (Logistik) und Transdev (Personennahverkehr). REMONDIS, SARIA und Rhenus hatten im Jahr 2024 insgesamt 96.000 Beschäftigte und erzielten rund 25 Mrd. Euro Umsatz (Forecast); darüber hinaus waren bei Transdev – hier hält die Rethmann-Gruppe eine Beteiligung von 34% - 102.000 Mitarbeiter beschäftigt, die einen Umsatz von 10 Mrd. Euro (Forecast) realisierten. Trotz dieser Dimensionen ist die Gruppe bis heute ein Familienunternehmen geblieben, das die Handschrift des vierfachen Familienvaters *Norbert Rethmann* trägt, der seine Fähigkeiten als Unternehmer mit einem klaren werteorientierenden Kompass verbindet. 2009 hat *Norbert Rethmann* die Aufgabe als Aufsichtsratsvorsitzender der RETHMANN SE &

Co. KG an seinen Sohn Dr. *Martin Rethmann* abgegeben und ist heute Ehrenvorsitzender des Aufsichtsrats der RETHMANN-Gruppe.

norbert.rethmann@rethmann-gruppe.de (marcel.derichs@saria.com)

Henrik Rother (*1974) arbeitet seit 2018 beim Geologischen Dienst des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt und leitet das Dezernat für Oberflächengeologie, Bodenkunde und Analytik. Nach einem Studium in den Fächern Geographie/Geologie an der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB), der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald und der University of Idaho (USA) promovierte er im 2006 im Fach Geologie an der University of Canterbury in Neuseeland mit dem Thema „Late Pleistocene geology of the Waiau valley system in North Canterbury, New Zealand: Glacial stratigraphy and implications for reconstructing glacial processes and paleoclimate“. Anschließend absolvierte er ein dreijähriges Postdoktorandenstudium am Institute for Environmental Research der Australian Nuclear Science and Technology Organisation in Sydney, Australien. Nach einem Jahr als Forschungsassistent am Scottish Universities Environmental Research Centre der University of Glasgow, hatte er von 2010 bis 2017 eine W1-Professur für Quartärgeologie und Petrographie am Institut für Geographie und Geologie der Universität Greifswald inne.

henrik.rother@sachsen-anhalt.de

Axel Schippers (*1966) leitet seit 2007 den Arbeitsbereich Geomikrobiologie an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover. Seine Arbeits- und Forschungsgebiete umfassen die Geomikrobiologie und die Biohydrometallurgie. Seit 2011 ist er außerdem außerplanmäßiger Professor an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover. Nach seinem Diplom in Biologie, im Rahmen dessen er die mikrobielle Diversität in zwei Uran-Abraumhalden des Bergbaus an der Universität Hamburg untersuchte, promovierte er 1998 an derselben Universität über die Schwefelchemie der Metall-Biolauung. Es folgte ein zweijähriges Postdoktorandenstudium an der Universität Hamburg im Rahmen eines Projekts des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Anschließend absolvierte er ein weiteres Postdoktorandenstudium zur anaeroben Oxidation von Metallsulfiden in marinen Sedimenten am Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen. Von 2001 bis 2007 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und

stellvertretender Leiter des Bereichs Geomikrobiologie an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover und seit 2007 leitet er diesen Bereich. Im Jahr 2006 habilitierte Axel Schippers an der Leibniz Universität Hannover.

axel.schippers@bgr.de

Karsten Schütze (*1962) arbeitet seit 1991 als Dezernent für Oberflächengeologie (Quartär) beim Geologischen Dienst im Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie in Mecklenburg-Vorpommern. Seine Arbeitsaufgaben umfassen die Landesaufnahme der Oberflächengeologie und des Geotopsschutzes und Georisiken in Mecklenburg-Vorpommern. Nach einer Ausbildung zum Geologiefacharbeiter mit Abitur, studierte er von 1983 bis 1988 Geologie an der Universität Greifswald.

karsten.schuetze@lung.mv-regierung.de

Melike Yildirim Ayıldız (*1997), MSc, promoviert aktuell am Lehrstuhl für Strukturgeologie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Promotionskollegs KLIREC (Klima, Ressourcen und Circular Economy). Zuvor hatte sie Geowissenschaften an der Technischen Universität in Istanbul studiert. Sie interessiert sich für globale Entwicklungen im Bereich der kritischen und strategischen Rohstoffversorgung.

melike.yildirim@partner.kit.edu