



GERRI

Das Deutsche Forschungsnetzwerk Rohstoffe

Verantwortungsvolle Rohstoffversorgung

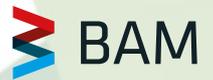
Positionspapier 2021

Innovationshebel für eine ressourceneffiziente, klimaneutrale
und kreislauforientierte Rohstoffwirtschaft

Handlungsempfehlungen



TU Clausthal



Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreislauf und
Ressourcenstrategie IWKS



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM



Zielsetzung des Positionspapiers

In der Reihe „Verantwortungsvolle Rohstoffversorgung“ erscheinen regelmäßig Positionspapiere des Deutschen Forschungsnetzwerks Rohstoffe GERRI (German Resource Research Institute) mit unterschiedlichem Fokus. In dem vorliegenden ersten Positionspapier zeigen die GERRI Partnerinstitutionen den **Forschungs- und Innovationsbedarf für eine ressourceneffiziente, klimaneutrale und kreislaforientierte Rohstoffwirtschaft** auf. Im Gesamtkontext sich ergänzender Dokumente wie etwa den aktuellen Berichten der Circular Economy Initiative Deutschland¹ und dem Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft² fokussieren die GERRI-Papiere ausschließlich auf die **mineralischen und metallhaltigen Rohstoffe**, d. h. Kunststoffe oder nachwachsende Rohstoffe werden nicht betrachtet. Der Fokus der Arbeiten von GERRI und damit auch dieses Papiers liegt zudem auf dem **Rohstoffkreislauf** und nicht auf dem ebenso wichtigen Produktkreislauf. Hier werden Ansatzpunkte für Innovationssprünge bei der Effizienz in der Rohstoffgewinnung und der Schließung von Stoffkreisläufen herausgearbeitet, die Verknüpfung der Fachrichtungen aufgezeigt und potenzielle Zielkonflikte dargelegt, um eine verantwortungsvolle Bereitstellung von Rohstoffen dauerhaft zu gewährleisten.

Hintergrund

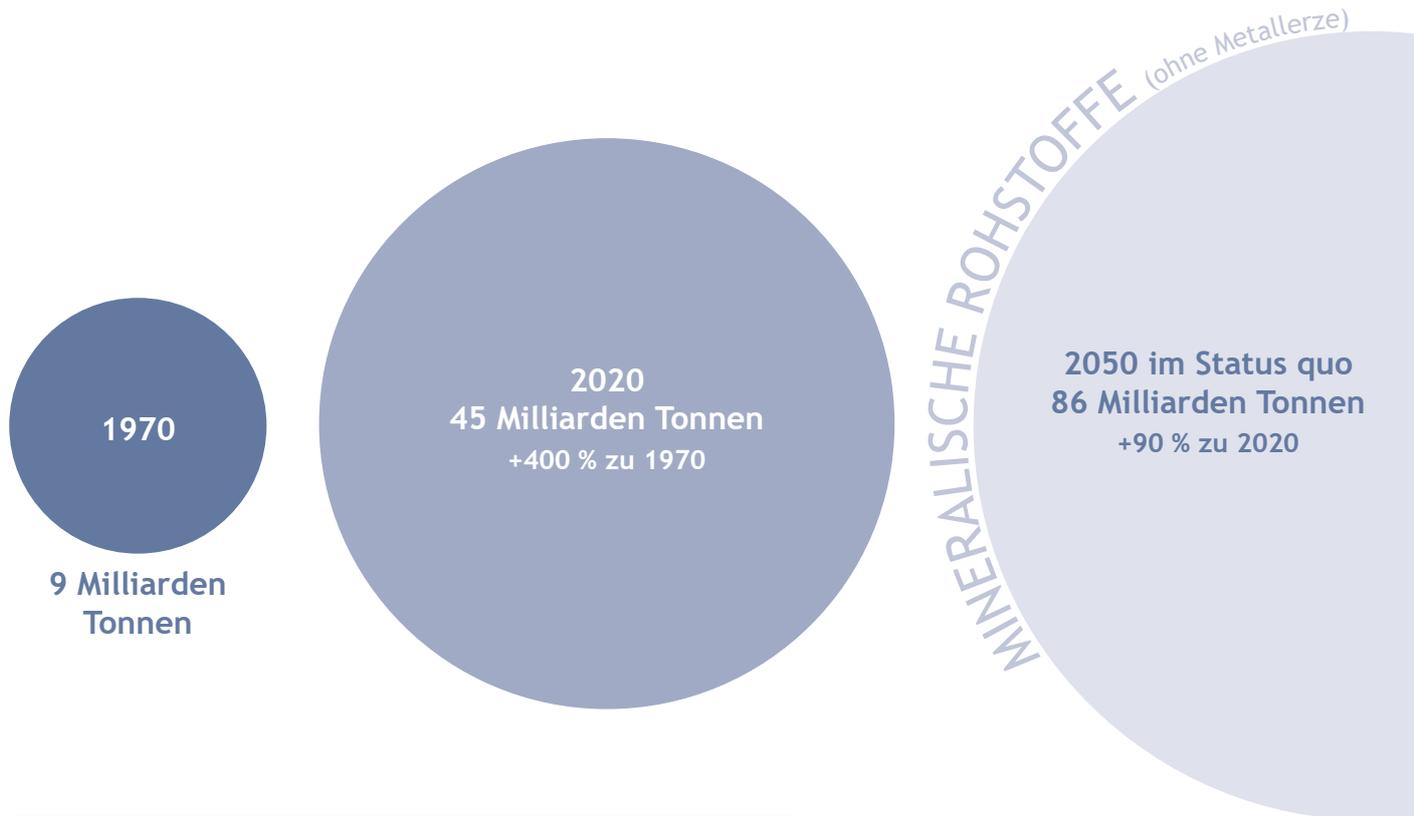
Natürliche Rohstoffe stellen die wichtigste Grundlage allen menschlichen Lebens und Handelns dar. Eine Teilmenge davon sind die **abiotischen mineralischen Rohstoffe**, die in diesem Papier adressiert werden. Dazu gehören sowohl die Erze, aus denen Metalle gewonnen werden, die Industriemineralien (z. B. Flussspat und Salze) sowie die Baurohstoffe (z. B. Sand, Kies, gebrochene Natursteine, Kalkstein, Tone und Gips). Mineralische Rohstoffe sind direkter und vielfältiger Bestandteil unseres Alltags, sei es in der Verkehrsinfrastruktur und Energieversorgung, in Gebäuden oder in Elektronikprodukten. Sie sind das Fundament für das produzierende Gewerbe und werden in erheblichen Mengen produziert und genutzt.

Fakten zur globalen Rohstoffentnahme



¹ CEID (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland

² PROGNOS AG (2020): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft



Weltweite Rohstoffgewinnung

54 Milliarden Tonnen Erze mineralischer Rohstoffe werden aktuell jährlich weltweit gewonnen. Davon entfallen 9 Milliarden Tonnen auf die Metallerze und 45 Milliarden Tonnen auf die weiteren mineralischen Rohstoffe, insbesondere Baurohstoffe. Das entspricht einer Steigerung von 250 % (Metallrohstoffe) bzw. 400 % (Nichtmetallrohstoffe) im Vergleich zu 1970³. Während die Baurohstoffe aufgrund ihrer Masse meist lokal oder regional gewonnen und verwendet werden (~560 Mio. Tonnen in Deutschland im Jahr 2019⁴), werden Metalle und Industriemineralien überwiegend auf einem globalen Markt gehandelt.

So basiert auch die deutsche Rohstoffversorgung auf drei Säulen: Heimische Rohstoffgewinnung – Importe – Recycling

Prognose des weiteren Rohstoffbedarfs

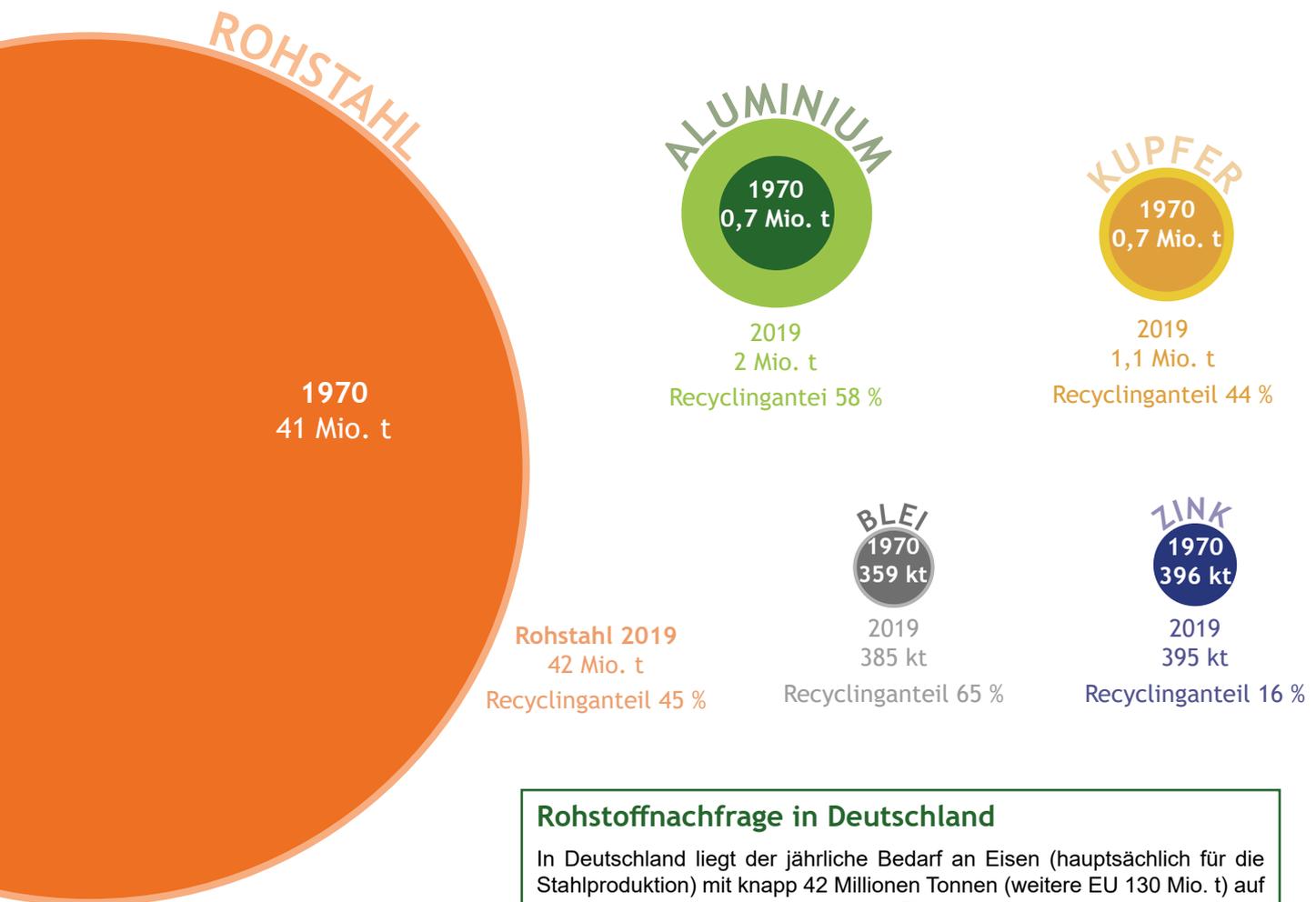
Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen wird in den kommenden Jahren weiterhin stark steigen. Auf globaler Ebene liegen die Gründe dafür vor allem im Bevölkerungswachstum verbunden mit einer Steigerung des Wohlstandes. Auch für die Zukunftsthemen wie Energie- und Mobilitätswende, Digitalisierung oder klimaneutrales Bauen wird der Rohstoffbedarf nach Art und Menge zunehmen. So prognostizieren die Vereinten Nationen³ eine Verdopplung der bergbaulichen Gewinnung bis 2050 mit jährlichen Wachstumsraten von 1,7 % für metallische Rohstoffe und sogar 2,2 % für weitere mineralische (Bau-)Rohstoffe, wenn sich die gegenwärtige Entwicklung bei der Rohstoffversorgung ohne eine radikale Neuausrichtung fortsetzt. Dabei ist die bergbauliche Gewinnung mineralischer Rohstoffe und in erster Linie deren Weiterverarbeitung zu Stahl, Aluminium, Kupfer oder Zement bereits jetzt für rund 20 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich³. Wenn auch mengenmäßig von geringerer Bedeutung, verzeichnen die Seltenelemente wie Lithium, Kobalt oder Seltene Erden, deren Gewinnung mit zahlreichen ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden ist, getrieben durch den Ausbau der Elektromobilität (u. a. für Batterien und Hochleistungspermanentmagnete für die Elektromotoren) einen enormen Zuwachs im zukünftigen Bedarf (jährl. Wachstumsraten bis 20 %).

³ IRP (2019): Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want

⁴ BGR (2020): Deutschland – Rohstoffsituation 2019



Fakten zur deutschen Rohstoffsituation



Rohstoffnachfrage in Deutschland

In Deutschland liegt der jährliche Bedarf an Eisen (hauptsächlich für die Stahlproduktion) mit knapp 42 Millionen Tonnen (weitere EU 130 Mio. t) auf einem vergleichbaren Niveau wie 1970. Bei den Nichteisenmassenmetallen (Aluminium, Kupfer, Blei, Zink, etc.) benötigt Deutschland jährlich rund 4,1 Millionen Tonnen (weitere EU 13,5 Mio. t). Während der Bedarf bei Kupfer, Blei und Zink im Vergleich zu 1970 nur moderat gestiegen ist (< 50 %), wird derzeit jährlich dreimal so viel Aluminium verarbeitet wie noch vor 50 Jahren⁵. Eine Bedarfssteigerung, die bei globaler Betrachtung alle mineralischen Rohstoffe betrifft.

Rohstoffimporte

Die EU und auch Deutschland, das für die meisten Metalle den größten Bedarf in Europa hat, sind in einem hohen Maße von globalen Importen abhängig (86,2 Mio. t Metalle im Wert von 74,8 Mrd. € in 2019⁴). Das gilt auch für die beim Recycling eingesetzten Schrotte, sodass das Recycling nicht per se zur Versorgungssicherheit beiträgt. Während Nichtmetalle zu 92 % aus dem europäischen Raum importiert wurden (29 Mio. t im Wert von 2,3 Mrd. € in 2019), liegt die Quote bei Metallrohstoffen (Erze, Konzentrate, Vor- und Zwischenprodukte sowie Raffinademetalle) unter 50 %⁴. Hier haben die globalen Lieferungen aus Südamerika (19,7 %), Afrika (12,7 %) und Nordamerika (10,9 %) eine größere Bedeutung. Bei den europäischen Importen handelt es sich zudem hauptsächlich um Zwischenprodukte und raffinierte Metalle, deren Erze häufig einen Ursprung außerhalb Europas haben.

5 BGR (2020): Fachinformationssystem Rohstoffe, unveröffentlicht

Aktueller Anteil Sekundärrohstoffe

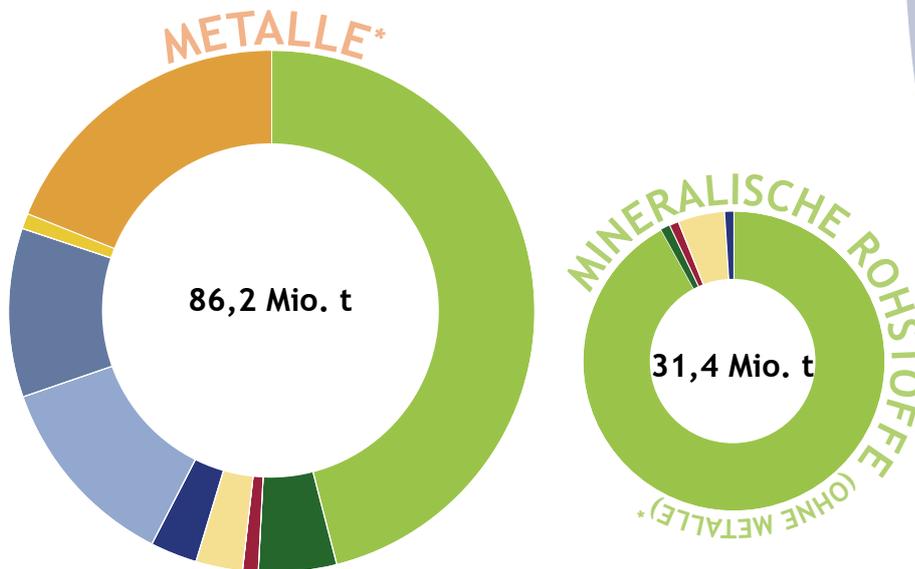
Global wird bisher nur ein geringer Teil des Rohstoffbedarfes mit Sekundärrohstoffen gedeckt. In der deutschen Raffinade- und Rohstahlproduktion stammen immerhin ~58 % des Aluminiums, ~44 % des Kupfers und ~45 % des Rohstahls aus sekundären Vorstoffen⁴. Dieser Wert ist seit einigen Jahren aufgrund begrenzter Anlagenkapazitäten konstant. Bei den Sondermetallen liegt die Recyclingquote u. a. aufgrund der geringen Rücklaufquote sowie der dissipativen Verteilung und den damit verbundenen hohen Kosten der Rückgewinnung in der Regel deutlich darunter. Verarbeitete Nichtmetallrohstoffe wie Ton (zu Ziegeln) oder Kalk (zu Zement) können nicht direkt zum Ausgangsmaterial recycelt aber als Substitute für primäre Rohstoffe wieder in den Kreislauf eingebracht und so verwertet werden. 2018 wurden von den in Deutschland anfallenden mineralischen Bau- und Abbruchabfällen mit 73,3 Millionen Tonnen etwa ein Drittel recycelt und als Recycling-Baustoffe zur Verfügung gestellt. Der Bedarf an mineralischen Baustoffen von 587 Mio. Tonnen konnte damit zu 12,5 % gedeckt werden. Bei Bauabfällen auf Gipsbasis liegt die Deponierungsquote trotz steigenden Gipsbedarf noch bei über 50 %⁶.

Derzeit wird in Deutschland überwiegend sogenannter REA-Gips, der aus den Abgasen der Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kohlekraftwerken gewonnen wird, eingesetzt. Mehr als 50 % des in Deutschland generierten Gipses (>11 Mio t Gips) entstammen der Rauchgasentschwefelung. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung wird somit mit einem signifikanten Anstieg der Gipsproduktion aus primären Lagerstätten verbunden sein.

MINERALISCHE BAUROHSTOFFE

Mineralische Baurohstoffe 2019
(Sand, Kies, Naturstein, Tone, Kalkstein, Dolomit)
587 Mio. t

Rohstoffimporte (nach Menge im Jahr 2019)



* Erze, Konzentrate, Zwischenprodukte und nachgelagerte Produkte entlang der Wertschöpfungskette einschließlich Halbzeug, ohne Waren.

- Europa
- Asien
- Nordamerika
- GUS-Staaten
- Australien/Ozeanien
- Zentralamerika/Karibik
- Naher Osten
- Afrika
- Südamerika



Um den Ressourcenverbrauch insgesamt deutlich zu senken, muss die Versorgung mit Sekundärrohstoffen deutlich gesteigert und die Rohstoffgewinnung generell ressourcenschonender und klimaneutraler gestaltet werden. Dies muss einhergehen mit einer **längeren Nutzungsdauer der Rohstoffe** in Produkten und Produktkreisläufen sowie einer **möglichst vollständigen Rückgewinnung** der am Lebensende in den Produkten enthaltenen Rohstoffe. Nur so kann die Ressourceneffizienz insgesamt deutlich erhöht und **das langfristige Ziel, eine Schließung der Stoffkreisläufe**, realisiert werden.

Diese Ziele stehen im Einklang mit den Nachhaltigkeits- und Klimazielen der Bundesregierung, die in der aktuellen Rohstoffstrategie⁷ und dem aktuellen Ressourceneffizienzprogramm⁸ verankert sind, sowie mit dem Green Deal der Europäischen Union.

Bestandteile einer kreislaforientierten Rohstoffwirtschaft

Im Sinne einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Rohstoffversorgung ist es erforderlich, Rohstoffkreisläufe unter Berücksichtigung der Umwelt-, Klima- und Sozialverträglichkeit als integrale Bestandteile innerhalb der thermodynamischen Grenzen weitgehend zu schließen, d.h. sofern es energetisch und wirtschaftlich sinnvoll ist. In einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) wird, wie bereits 2014 von der EU-Kommission definiert⁹, der in den Produkten enthaltene Mehrwert so lange wie möglich erhalten. Wenn ein Produkt das Ende seiner Lebensdauer erreicht hat, verbleiben die Ressourcen im Kreislauf, so dass sie immer wieder produktiv genutzt werden können und damit eine weitere Wertschöpfung ermöglichen. Somit ist auch die Ressourceneffizienz deutlich weiter zu fassen als die reine Betrachtung des Rohstoffaufwandes.

Dieses Positionspapier unterscheidet zwei Kreisläufe, die im System der Kreislaufwirtschaft eng miteinander verknüpft sind (Abbildung 1):

- Den **Produktkreislauf** mit Produktion, Nutzung, Wiederverwendung und dem Management der Rest- und Abfallstoffe. Die Herausforderung an den Produktkreislauf besteht darin, die darin verwendeten Rohstoffe solange wie möglich zu nutzen (Langlebigkeit der Produkte) sowie die Rohstoffe so zu verwenden, dass sie mit möglichst geringem Aufwand dem Rohstoffkreislauf wieder zugeführt werden können. Der Produktkreislauf wird hier zwar nicht weiter betrachtet, klar ist aber, dass die R-Regeln mit Reduce/Re-use/Re-manufacture/Repair immer vor dem Recycling zu Sekundärrohstoffen stehen sollten.
- Den **Rohstoffkreislauf**, der den Produktkreislauf mit Rohstoffen füllt, aus diesem aber auch mit den unvermeidlichen Rest- und Abfallstoffen versorgt wird. Das Papier fokussiert sich auf diesen Rohstoffkreislauf.

Die kreislaforientierte Rohstoffwirtschaft schließt auch die **bergbaulich gewonnenen Primärrohstoffe als erste Säule der Versorgung** ausdrücklich mit ein. Eine Primärrohstoffgewinnung ist aufgrund des weiter steigenden Rohstoffbedarfes sowie auch bei funktionierenden Kreislaufsystemen weiterhin unabdingbar. Diese muss ressourceneffizient und nachhaltig gestaltet werden. Erst mittel- bis langfristig können, auch aufgrund einer anzustrebenden langen Produktnutzungsdauer und eines „gefüllten“ anthropogenen Rohstofflagers, Rohstoffe in signifikanten Mengen im Kreislauf geführt werden und sekundäre Rohstoffe die Nachfrage auch absolut decken.

⁷ BMWi (2020): Rohstoffstrategie der Bundesregierung

⁸ BMU (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm ProgRess III

⁹ EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014): Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe – COM(2014)398

Um im Rohstoffkreislauf eine hohe Ressourceneffizienz durch die Schließung von Kreisläufen zu erreichen, ist die **Stärkung des Recyclings** mit den Schritten Aufbereitung und Metallurgie bzw. Weiterverarbeitung mineralischer Rohstoffe ein elementarer Bestandteil. Hierbei sollten alle möglichen Sekundärquellen genutzt, Recyclingkapazitäten ausgebaut und die Technologien so weiterentwickelt werden, dass mittelfristig alle relevanten Roh- und Werkstoffe technisch und wirtschaftlich zurückgewonnen und in den Markt zurückgeführt werden können.

Die Circular Economy ist nur als systemischer Ansatz zu erreichen. Dafür benötigt es ein **umfassendes Stoff- und Prozessmanagement**. Neben den großen Chancen, die das Recycling im Speziellen und die Circular Economy im Allgemeinen bieten, müssen jedoch auch die **Grenzen dieser Systeme**, sowohl naturwissenschaftlicher, technologischer als auch wirtschaftlicher und ökologischer Art, bewertet und dargestellt werden. So sind nicht verwertbare Reststoffe in allen Stufen der Circular Economy unabdingbar, sollten aber so gering wie möglich gehalten und aus dem Kreislauf sicher ausgeschleust werden. Dies betrifft auch schadstoffhaltige Fraktionen, die dem Kreislauf entzogen werden sollten, um die Sicherheit und Qualität der aus Sekundärrohstoffen hergestellten Produkte zu gewährleisten.

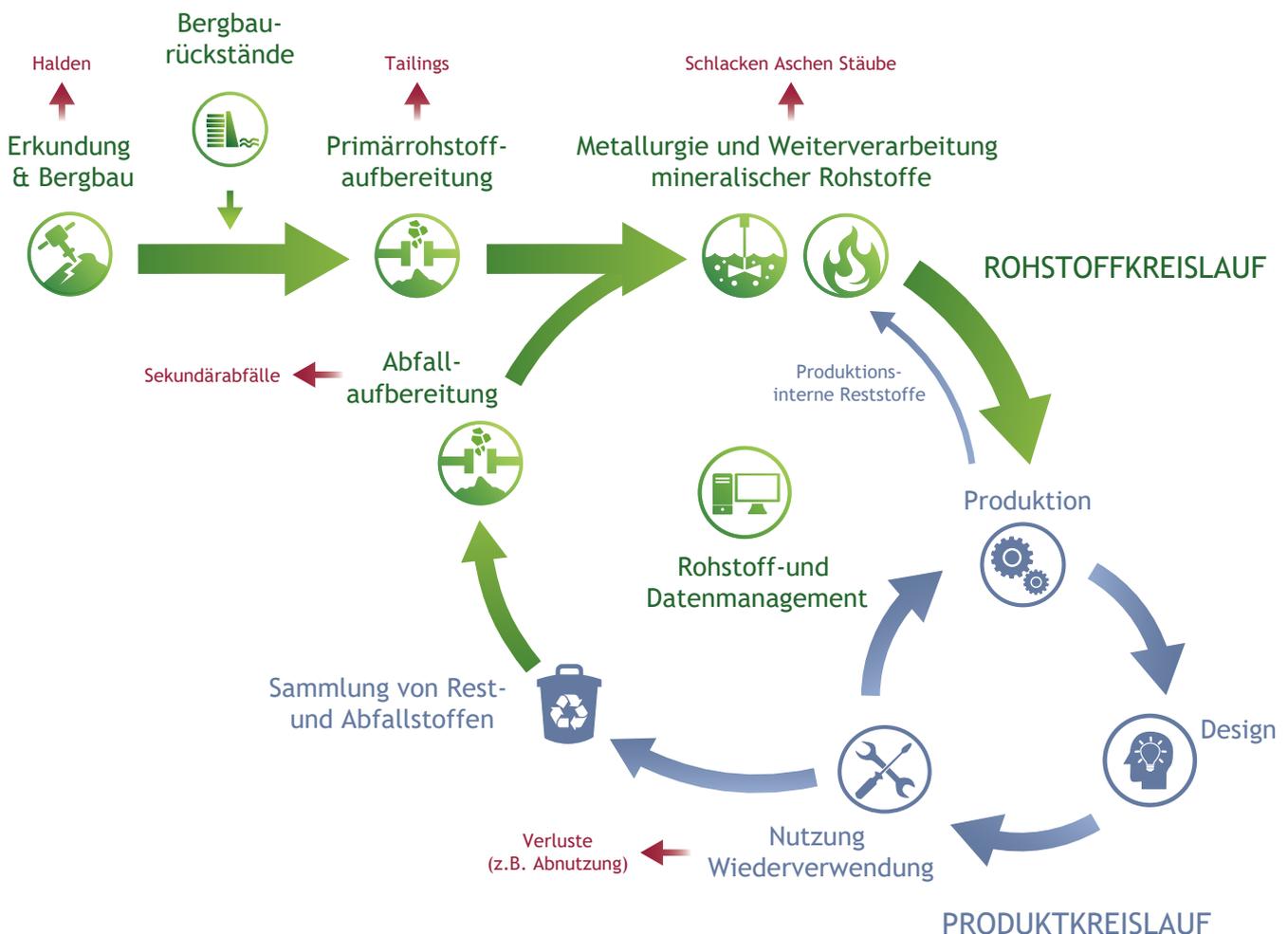


Abbildung 1: Modell einer kreislauforientierten Wirtschaft. Der Rohstoffkreislauf (grün) und der Produktkreislauf (blau) sind direkt miteinander verknüpft, wobei der Rohstoffkreislauf den Produktkreislauf mit Rohstoffen versorgt und aus diesem mit nicht mehr nutzbaren Reststoffen gespeist wird.



Herausforderungen und Ziele

... in den Stufen der kreislaforientierten Rohstoffwirtschaft



Erkundung & Bergbau

Für den Wandel zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft muss das Inventar der Technosphäre mit Primärrohstoffen, die im Bergbau gewonnen werden, weiterhin ergänzt werden. Aber auch im Bergbauprozess muss die Ressourceneffizienz deutlich gesteigert und so die natürlichen Ressourcen geschont werden. Die **Ansatzpunkte für eine Steigerung der Ressourceneffizienz im Bergbau** liegen insbesondere in den folgenden Bereichen:

- Bereits bei der **Exploration** als ersten Schritt für den Bergbau müssen die Nachhaltigkeitsaspekte integriert sowie auf einen ressourceneffizienten Bergbau ausgerichtet werden. Da die mineralische Rohstoffexploration nur selten in ein wirtschaftlich durchführbares Bergbauprojekt mündet, **sollte die Erkundung möglichst zerstörungsfrei und kontaktlos erfolgen**. Hier können neue Ansätze mit luftgestützten hyperspektralen und geophysikalischen Methoden, auch in Kombination mit bodengestützten Verfahren, weiterentwickelt werden, um die Eindringtiefe und die Auflösung zu verbessern. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bestehen bei der Integration bestehender und neu zu erhebender Datensätze aus Feld und Labor und deren Interpretation mittels Anwendungen des maschinellen Lernens/KI, um zielgerichteter zu erkunden und somit Bohrungen zu reduzieren.
- Ein wichtiger Baustein ist ein **effizienter Energieeinsatz** sowie die **Integration von regenerativen Energien in Bergbaubetriebe**, um den Energiebedarf generell zu senken und den CO₂-Fußabdruck zu minimieren.
- Weiteres Potenzial liegt in einer drastisch **reduzierten Frischwasserinanspruchnahme** (z. B. über die Kreislaufführung von Prozesswasser oder die Nutzung von Salzwasser), um Grund- und Oberflächenwässer quantitativ und qualitativ zu schonen.
- Ein entscheidender Aspekt ist die Senkung der Flächeninanspruchnahme. Der Hebel sind optimierte, zielgerichtete Erkundungs- und Abbaumethoden. Maßnahmen zur Rekultivierung bzw. Nachnutzung sollten dabei von vornherein begleitend integriert werden. Ein sehr wichtiger Punkt ist hier zudem die Pflicht zur Wiedernutzbarmachung für die Zeit nach dem Bergbau.
- Die Erhöhung des Lagerstättennutzungsgrads bietet weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. Ansatzpunkte sind die vollständige Gewinnung aller nutzbaren Produkte (Haupt-, Bei- und Nebenprodukte) unter möglichst weitgehender Verwertung der Reststoffe.
- Historische Bergbau- und Verhüttungsrückstände, wie Bergbauhalden, Tailings und Schlacken, vor allem aus dem Erzbergbau und der nachgeschalteten Verarbeitung, die teilweise noch erhebliche Mengen an Wertstoffen enthalten, sollten für eine Rückgewinnung genutzt werden. Ein Rückbau kann die mit den Bergbauablagerungen verbundenen Umweltgefährdungen und Sanierungskosten gleichzeitig verringern. Da zunehmend Lagerstätten mit geringen Erzgehalten abgebaut werden, nehmen die Mengen anfallender Bergbaurückstände zu. Diese zu nutzen und sinnvoll zu verwenden, auch um Flächeninanspruchnahme und von den Rückständen ausgehende mögliche Risiken zu minimieren, wird daher immer relevanter.
- Das Monitoring von Stoff- und Energieflüssen im Bergbau liefert nicht nur wichtige Parameter für eine Optimierung der Rohstoffgewinnung, sondern ist auch Ausgangspunkt für die Erfassung der Lebenszyklusdaten von Rohstoffen. Dieses stellt eine immer wichtigere Entscheidungsgrundlage

für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten und Technologien sowie von Investitionen dar. Dabei ist die Anforderung, das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, für den energieintensiven Bergbau, wie auch der Aufbereitung, eine besonders große Herausforderung.

Technologische Innovationen bieten große Möglichkeiten zur Verbesserung der Ressourceneffizienz, des Umweltschutzes sowie auch der Sicherheit bei der Rohstoffgewinnung. Bereits das Auffinden neuer Lagerstätten kann durch intelligente Datenverarbeitung und multikriterielle Interpretation über KI und maschinellem Lernen erleichtert werden. Eine zunehmende Automatisierung der Primärrohstoffgewinnung und -verarbeitung kann die Ressourceninanspruchnahme des Bergbaus deutlich verbessern. Über eine selektive und autonome Gewinnung und sensorgestützten Vorsortierung in den nachfolgenden Prozessschritten können der Energiebedarf und Ressourcenverbrauch ebenfalls drastisch reduziert werden. Zudem wird die Gewinnung aus kleinen, schwer zugänglichen Lagerstätten, die bisher nicht im Fokus stehen, da technisch und wirtschaftlich aktuell nicht gewinnbar, ermöglicht. So kann das primäre Rohstoffangebot, auch in Deutschland und Europa, diversifiziert und damit auch das vorhandene heimische Potential mehr genutzt werden.

Foto: Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH.





Generell ergeben sich folgende Herausforderungen für einen ressourceneffizienten Bergbau:

- **Digitalisierung und Automatisierung** bieten ein großes Potenzial für einen ressourcenschonenden und -optimierten sowie sicheren und nachhaltigen Bergbau. Die Potenziale von Sensortechnologien, die den rauen Umgebungsbedingungen des Bergbaus gewachsen sind, die Kommunikation, Vernetzung und künstliche Intelligenz im Sinne autonomer Gewinnungssysteme müssen ausgebaut und ihre Anwendung im Bergbausektor in der Breite gefördert werden. Dabei gilt es auch, eine übergreifende Vernetzung zu dem nachgeschalteten Prozess der Aufbereitung zu berücksichtigen.
- **Klimaneutralität** im energieintensiven Bergbau ist nur zu erreichen, wenn auch die Energiequellen klimaneutral sind. Dafür sind erhebliche Investitionen in Infrastruktur und Technologien erforderlich, die für laufende Bergwerke aufgrund der verkürzten Amortisationszeit kaum noch wirksam werden können. Umso wichtiger ist es, Anreize für eine klimaneutrale Produktion, insbesondere für die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energiequellen, vor allem bei Erweiterungen und dem Neubau von Bergwerken, zu schaffen. Aber auch für bestehende Bergbaubetriebe müssen Ansätze und Technologien entwickelt werden, die eine Integration von erneuerbaren Energien in bestehende Prozesse ermöglichen.
- **Bergbaurückstände** sollten optimal genutzt und (wieder)verwendet werden. Dies erfordert geeignete Rahmenbedingungen für die Verwertung aktuell anfallender Reststoffe. Das Potenzial von Bergbaureststoffen sollte darüber hinaus erfasst und Nutzungskonzepte einschließlich entsprechender Aufbereitungsprozesse entwickelt werden.
- Der Einfluss des Bergbaus auf die **Wasserressourcen** kann lokal beträchtlich sein. Gleichzeitig muss sich der Bergbau an mögliche Änderungen durch den Klimawandel anpassen. Neben wassereffizienten Technologien muss ein Management, das zukünftige klimabedingte Änderungen im Wassereinzugsgebiet berücksichtigt, etabliert und ggfs. auf Nutzung saliner Wässer in der Prozessführung umgestellt werden.
- Der Großteil der weltweiten Rohstoffproduktion findet außerhalb Europas statt. **Partnerschaften, insbesondere mit Entwicklungs- und Schwellenländern**, sollten Wissen und Technologien für eine ressourceneffiziente Rohstoffproduktion auch weltweit fördern.



Aufbereitung

Der Prozess der Aufbereitung umfasst sowohl die Aufkonzentration von geförderten Primärrohstoffen aus dem Bergbau zu weiterverarbeitbaren Konzentraten, Bau- und Werkstoffen (Primärrohstoffaufbereitung) als auch die Behandlung von Reststoffen und Abfallströmen aus Produktion, Handel, Konsum und sonstiger Nutzung (Abfallaufbereitung). Der Wiedereinsatz der aus Reststoffen und Abfällen gewonnenen Sekundärrohstoffe muss die Rohstoffbasis zunehmend ergänzen und langfristig weitgehend ersetzen. Auf dem Weg dahin liegen sowohl bei der ressourceneffizienten Aufbereitung der Primärrohstoffe als auch der Rest- und Abfallstoffe noch **vielfältige technologische Herausforderungen**:

- Bei der Aufbereitung von Rohstoffen steht ein **möglichst hohes Ausbringen aller werthaltigen Komponenten** im Vordergrund. Deren Gehalte liegen bei Steinen und Erden sowie den Erzen der Industriemineralen wie Fluss- und Schwerspat relativ hoch, bei den Metallerzen teilweise nur bei niedrigen Prozentwerten (z. B. durchschnittlich 0,7 % bei den im Abbau stehenden Kupferlagerstätten).

Diese müssen für die weiterführenden metallurgischen Schritte optimal aufgeschlossen und aufkonzentriert werden.

- Die **Reduzierung der Reststoffe aus der Primärgewinnung**, entweder durch direkte Verwertung zur Verfüllung der Lagerstätten oder als Bau- oder sonstiger Werkstoff, ist für eine hohe Ressourceneffizienz sowie eine Vermeidung von abzulagernden Rückständen elementar.
- Ein entscheidender Aspekt bei der Aufbereitung von Primärrohstoffen ist die **Reduktion des hohen Energiebedarfs** insbesondere bei der Zerkleinerung von feinkörnigen Erzen. Verbesserungspotenzial bieten hierfür die Werkzeuge der Automatisierung in Kombination mit der Digitalisierung, insbesondere durch eine gezielte Maschinensteuerung und Prozessüberwachung. Mit einer selektiven Gewinnung und der präzisen Charakterisierung von Erzen und Rohmaterialien sind Effizienzsprünge möglich. Eine sensorgestützte Vorsortierung kann die Aufbereitungsprozesse von Erzen aber auch von Sekundärrohstoffen optimieren.
- **Die Komplexität der anthropogenen Rohstoffpotentiale in den Rest- und Abfallstoffen** stellt eine fundamentale Herausforderung dar. Diese unterscheiden sich wesentlich je nach Stoffstromart und die Komplexität steigt von den Primärrohstoff-nahen Reststoffströmen aus Bergbau und Hüttenindustrie, über Produktionsrückstände bis zu Mineralstoff-dominierten Massenabfällen sowie Altprodukten, Konsumgütern, Müllverbrennungsrückständen und Deponiegut an. Gerade im Bereich von Hightech-Produkten wie Elektrogeräten, Fahrzeugen oder Batterien finden immer mehr Rohstoffe Anwendung. Die Problematik der ohnehin schon hohen Komplexität für Aufbereitung und Rohstoffrückgewinnung wird durch immer schnellere Innovationszyklen und damit einhergehend Änderungen im Produktaufbau verstärkt. Auch werden viele Sekundärrohstoffe zurzeit noch durch „Down-Cycling“ verwertet, so dass ein wesentliches Potential an Rohstoffen verloren geht bzw. deutlich wertvermindert genutzt wird. Wesentliche Ansatzpunkte liegen in folgenden Bereichen:
 - Die Verarbeitung sekundärer Rohstoffströme von Altprodukten kann durch eine digitalisierte Logistik deutlich verbessert werden. Ein digitaler Rohstoffinhaltspass ermöglicht ein Identifizieren und Vorsortieren von Produkten mit ähnlichem Rohstoffinhalt und anschließende gezielte Verarbeitung mit neuen oder modifizierten Aufbereitungstechniken.
 - Die mechanische Aufbereitung bei sekundären, komplexen Stoffströmen kann durch agile und flexible, stark automatisierte und digitalisierte Aufbereitungsanlagen verbessert werden.
 - Neben den rein verfahrenstechnischen Herausforderungen sind Fragen zur Strukturierung der gesamten Recyclingkette, der Auslegung und Lokalisierung einzelner Anlagen, der Erfassung und Logistik, Lagerhaltung und Pufferung sowie der Mehrfachverknüpfungen von mechanischen, thermischen und chemischen Prozessen gerade bei der Verwertung der Hightech-Altprodukte entscheidend. Insbesondere die intelligente Kombination von chemischem Recycling (für C-basierte sekundäre Rohstoffe) und physikalisches Recycling (für Metalle, Minerale) werden notwendig sein.

Bei der Aufbereitung von Primärrohstoffen sowie Rest- und Abfallstoffen gilt darüber hinaus grundsätzlich, dass der **Einsatz erneuerbarer Energien** für die unterschiedlichen Prozesse entscheidend ist. Ein besonders **hohes Optimierungspotenzial liegt zudem an der Schnittstelle der Aufbereitung zur Metallurgie (für metallhaltige Stoffe) bzw. Weiterverarbeitung der übrigen mineralischen Reststoffe**. Nur durch die Abstimmung der konsekutiven Prozessschritte untereinander flankiert von entsprechender interdisziplinärer Forschung wird es möglich sein, die Vision eines umfassenden Recyclings komplexer sekundärer Rohstoffströme im Sinne der Nachhaltigkeit optimal umzusetzen.



Generell ergeben sich folgende Herausforderungen für eine nachhaltige Aufbereitung:

- Der **hohe Energiebedarf**, insbesondere für die Zerkleinerung, muss über effiziente Aufbereitungsprozessschritte reduziert und aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Moderne Sensor- und IT-basierte Technologien zur Maschinen- und Prozesssteuerung sowie deren Überwachung einschließlich vorausschauender Instandhaltungsplanung sind hierzu ebenfalls essentiell.
- Die **exakte Charakterisierung** von primären und sekundären Rohstoffströmen ist – verbunden mit einer Eliminierung von Stör- und Schadstoffen ein entscheidender Baustein für die Bereitstellung hochwertiger Materialien. Hier muss auch die Schnittstelle zum Design der Produkte gewährleistet werden.
- Die konsekutiven Prozessschritte, z. B. an der **Schnittstelle zwischen Aufbereitung und Metallurgie**, müssen optimiert und zu ressourceneffizienten, mechanisch-thermisch-chemischen Prozessketten verknüpft werden.
- Bei der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen aus dem Primär- und Sekundärbereich steht verstärkt eine **Diversifizierung nutzbarer Stoffströme** unter abnehmerspezifischer Veredelung im Fokus, die den Anteil nicht verwertbaren Materials auf ein Minimum beschränkt.



Metallurgie und Weiterverarbeitung mineralischer Reststoffe

Die metallurgischen Methoden sind für **Gewinnungs- und Recyclingprozesse von Metallen durch Extraktion und Raffination** elementar. Neben oder in Kombination mit pyrometallurgischen Prozessen bieten hydrometallurgische Verfahren wie die (Atmosphären-)Druck- oder Biolaugung verschiedene Möglichkeiten, Metalle aus Primär- und Sekundärrohstoffen mit Lösungen oder Mikroorganismen zu extrahieren. Auch die Laugung mit unkonventionellen Lösemitteln oder unter Einsatz von salinen Wässern gewinnt an Bedeutung. Solventextraktion, ionenselektive Abscheidung und Membranverfahren bieten zunehmend größere Potentiale, Metalle aus metallurgischen Lösungen und Abwässern zu extrahieren und anzureichern. Im Bereich der Pyrometallurgie spielen Schutzgas- oder Vakuumtechnologien, wie z. B. „Low Cost“-Recyclingtechnologien zur eindeutigen Trennung von Metallen aus Abfällen oder Nebenprodukten, eine wichtige Rolle zur Herstellung hochreiner Metalle. Im Hinblick auf eine deutliche Steigerung der Ressourceneffizienz und Kreislauforientierung muss in den folgenden Bereichen angesetzt werden:

- Große Effizienzpotenziale bestehen generell aufgrund des **hohen Energie- und Chemikalienbedarfs** in den metallurgischen Verfahren und Prozessen. Dies gilt z. B. im Bereich der Pyrometallurgie durch den Ersatz von kohlenstoff- durch wasserstoffbasierte Reduktionsprozesse, den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien in Elektroofenprozessen und die Substitution primärer fossiler Energieträger durch Biomasse-basierte Kokse. Im Bereich der Hydrometallurgie steht die Reduzierung des Frischwasserverbrauchs und der Abwassermengen sowie die Reduzierung einzusetzender Chemikalienmengen etwa durch intelligent gesteuerte Gegenstromprozesse und den Ersatz bestimmter Chemikalien durch umweltfreundlichere Alternativen im Fokus. Auch eine energieeffiziente Prozessführung, z. B. durch autotherme Arbeitsweise oder abgestimmte Aufbereitung/ Metallurgie, spielt eine wichtige Rolle in der Gestaltung innovativer Recyclingprozessketten.
- Ein weiterer Aspekt ist die **Integration von Primär- und Sekundärmaterialien**. Mit wenigen Ausnahmen unterscheiden sich Metalle, die aus Sekundärrohstoffen erzeugt wurden nicht von denen, die aus Primärrohstoffen gewonnen wurden. Daher ist der Recycleinsatz weitgehend gut möglich.

Entwicklungsbedarf besteht beim Recycling bestimmter Materialien, z. B. von Aluminiumlegierungen, die mit möglichst geringem Verlust und legierungsrein wiedergewonnen werden sollten, oder von Metallen- bzw. deren Salzen aus bestimmten Abfällen zu hochreinen Stoffen, so z. B. Cobaltsulfat oder Lithiumkarbonat für die Kathodenproduktion für Lithium-Ionen-Batterien.

- Zudem gilt es **branchenübergreifende Potentiale** zu identifizieren und zu nutzen. Der Abfall einer Branche kann ggf. von einer weiteren Branche sinnvoll in einem Recyclingprozess zusammengeführt werden. Mineralische Abfälle können z. B. geeignete Schlackenbildner für pyrometallurgische Prozesse darstellen. Auch die Verwertbarkeit eines Nebenproduktes, z. B. Schlacke für die Verwendung in Bindemitteln oder anderen Baustoffen, sollte das Ziel sein. Hier ist eine branchenübergreifende Kooperation und gemeinsame Entwicklungsarbeit erforderlich.
- Es muss ein wichtiges Ziel sein, **die metallurgische industrielle Infrastruktur in Europa zu stärken**, um für eine Metallurgie der Sekundärrohstoffe die erforderliche Basis bereitzustellen. Die Metallurgie stellt für viele Metalle aufgrund der relativ geringen Hüttenanzahl den Flaschenhals in der Bereitstellung von Raffinadeprodukten dar. Für eine nachhaltige Versorgung liegt eine Herausforderung auch darin, die Quasi-Monopolstellung einiger Länder, insbesondere für die Raffinade von Sondermetallen (z. B. China für Magnesium oder Seltene Erden), aufzubrechen und neue regionale Verarbeitungskapazitäten zu entwickeln. Nur so kann sichergestellt werden, dass Schrotte für die weitere Aufbereitung nicht in andere Länder außerhalb der EU transportiert werden müssen. Hier ist auch der Aus- und Aufbau von Recyclingkapazitäten für mindere Abfall- und Schrottqualitäten zu berücksichtigen.
- Die Rückgewinnung von Metallinhalten in komplexen Materialverbunden erfordert grundsätzlich kosteneffiziente, verbesserte Aufschlusstechnologien, neuartige Sortiertechniken, aber auch intelligent verknüpfte Prozesse und Verfahren, die mehrere Zielelemente zugleich zurückgewinnen können. Da gerade im Sekundärbereich die Stoffstromzusammensetzung und -menge schwanken können, sind **adaptive bzw. modulare Prozesse** eine Möglichkeit diesen Anforderungen gerecht zu werden.
- Neben der Wirtschaftlichkeit müssen aber auch **die physikalischen und thermodynamischen Grenzen der Rückgewinnung** beachtet werden. Welche kombiniert vorliegenden Elemente können mit Hilfe pyro- und/oder hydrometallurgischer Verfahren getrennt werden, welche Elemente gehen in die Schlacke über und wie können diese gezielt extrahiert werden? Insbesondere in Bezug auf die aufzuwendende Energie ist Recycling daher auch unter ökologischen Gesichtspunkten zu betrachten. Der Wegfall von Metallen wie beispielsweise Blei und Kupfer ließe das **inländische System des Multi-Metall-Recyclings** zusammenbrechen. Diese Metalle erfüllen in metallurgischen Recyclingprozessen sehr wichtige Funktionen, so dass sie unabdingbar sind, auch für die Rückgewinnung wirtschaftsstrategischer und kritischer Metalle.



Foto: Temperaturmessung im pyrometallurgischen Top Blown Rotary Converter (TBRC). © RWTH Aachen University / Martin Braun.



Die **Weiterverarbeitung mineralischer Rest- und Abfallstoffe** kann aufgrund der Stoffvielfalt sehr komplex sein. Hier liegen aber aufgrund hoher Massenströme mit relativ konstanter Zusammensetzung auch enorme Potentiale.

Insbesondere die im Baubereich bewegten großen Massenströme sind sowohl in Deutschland als auch in der EU von besonderer Bedeutung für eine kreislaforientierte Rohstoffwirtschaft. Zunächst kann festgestellt werden, dass die Entwicklung von Techniken für das Recycling von Baureststoffen schon seit einigen Jahrzehnten intensiv vorangetrieben wird. Dabei standen bisher vor allem Aufbereitungsverfahren für Massenreststoffe wie Betonabbruch im Vordergrund. Ausgangsmaterialien wie Bauschutt und mineralische Rückstände aus der Aufbereitung komplexer Abfallströme aber auch Althalden früherer Industriemineralproduktion gewinnen auch im Hinblick auf ein nachhaltiges Bauen zunehmend an Bedeutung. Auch andere Abfallströme lassen sich tiefgehend aufbereiten und zu Vorstoffen der Baustoffproduktion verarbeiten. Beispielsweise bieten Si-Al-Ca-Fe-dominierte Schlacken und Aschen aus thermischen Prozessen ein großes Potential als CO₂-entfrachteter Eingangsstoff, z. B. in der Zement- aber auch in der Keramikproduktion. Verknappung natürlicher Ressourcen wie Bausand aber auch zu substituierende Sekundärrohstoffe wie REA-Gips oder Aschen der Kohlefeuerung und Zielkonflikte bei dadurch notwendig werdenden verstärktem Primärrohstoffabbau verschärfen die Situation. Wesentliche Treiber sind zudem etwa die Einsparung von Deponievolumen und eine CO₂-Einsparung in der Baustoffproduktion. Für eine **optimierte Kreislaufführung von mineralischen Primär- und Sekundärrohstoffen ergeben sich verschiedene, sich ergänzende Ansätze:**

- Die anfallenden Stoffströme an mineralischen Reststoffen aus dem Baubereich können durch effiziente Aufbereitungsverfahren zu qualitativ gut wiederverwertbaren Sekundärrohstoffen aufbereitet werden. Ziel ist die Herstellung **weitgehend sortenreiner Stoffströme**, damit die gewonnenen Sekundärrohstoffe möglichst hochwertig wieder einsetzbar sind. Bei der Entwicklung oder Weiterentwicklung der Recyclingverfahren ist – neben einer Optimierung in Hinblick auf Sortenreinheit, entstehende Abfallmengen und Energieverbrauch – insbesondere auf die Wirtschaftlichkeit zu achten, da Massenbaustoffe überwiegend Low-Cost-Produkte sind.
- Ein weiterer Ansatz für die Gewinnung möglichst sortenreiner Sekundärbaustoffströme aus Baurestmassen liegt in der **Optimierung von Rückbauverfahren** zur Erfassung der unterschiedlichen Baustoffe noch vor der Vermischung als Bauschutt. Dies ist wiederum stark von den Konstruktionen der rückzubauenden Bauwerke abhängig.
- Zukünftig sollte deshalb schon bei der Planung von Bauwerken ein **ressourcenschonendes und recyclinggerechtes Bauen** angestrebt werden: dies können z. B. eine Reduktion der Materialvielfalt und des Materialeinsatzes durch einfache Kubaturen oder Leichtbauweisen sowie demontagefreundliche und abfallarme Konstruktionen sein. Ebenso ist darauf zu achten, dass Materialverbünde auch nach dem Ende ihrer Lebensdauer trennbar sind bzw. als Verbund rohstofflich verwertet werden können. Durch neue Systeme wie BIM (Building Information Modelling), die unter anderem zur Erfassung von Art und Lage der verbauten Materialien dienen, wird der Weg für die Optimierung des zukünftigen „Urban Minings“ bereits vorgezeichnet.
- Auch die Erhöhung der **Dauerhaftigkeit** der eingesetzten Baustoffe kann zu einer ressourceneffizienten Rohstoffwirtschaft beitragen. Durch die Verlängerung von Standzeiten, der Wiederverwendung von Gebäudeteilen auch außerhalb des Ursprungsgebäudes, flexibler Gebäude und Bauwerke, die bei Bedarf leicht umgenutzt werden können statt rückgebaut werden müssen und damit verbunden die längere Nutzung von Bauwerken werden sowohl der Rohstoffbedarf für Neubauten als auch der Reststoffanfall verringert: die Baustoffe verbleiben länger im Kreislauf.

Große Massenströme an mineralischen Rückständen fallen auch bei der Verbrennung von Biomassen und Klärschlämmen an. Biomasseaschen wie Holz – oder Papieraschen können u. a. als Ausgangsstoffe zur Herstellung von Bindemitteln für die Baustoffindustrie verwendet werden. Darüber hinaus stellen jedoch die enthaltenen Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, die eigentliche Wertkomponente verschiedener Aschen biogenen Ursprungs dar. Mehr als 70 % der Klärschlämme werden in Deutschland mittlerweile thermisch verwertet, mit steigender Tendenz. In Monoverbrennungsanlagen werden Klärschlammaschen mit Phosphorgehalten von 6 – 12 % erzeugt. Sie stellen damit geeignete Ausgangsstoffe für die Herstellung von Düngemitteln dar. Werden phosphathaltige Klärschlammaschen zu Düngemitteln verarbeitet, so muss berücksichtigt werden, dass ökotoxikologisch bedenkliche Schadstoffe wie etwa Cadmium, Blei und Quecksilber entfernt werden. Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass die Sekundärphosphate für Pflanzen verfügbar sind und ihre Düngewirkung derer kommerzieller Düngemittel entspricht. Nasschemische und thermochemische Verfahren können hier in naher Zukunft für die Phosphatgewinnung aus Klärschlammaschen im industriellen Maßstab eingesetzt werden.

Die generellen Herausforderungen für eine nachhaltige Metallurgie und Weiterverarbeitung von mineralischen Reststoffen sind:

- Technische Innovationen zur flexiblen Adaption an die unterschiedlichen Stoffströme, zur Effizienzsteigerung, Energieeinsparung und CO₂-Neutralität sowie zur Integration von Primär- und Sekundärrohstoffströmen können nur in disziplin- und branchenübergreifenden **Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie** gestärkt und ausgebaut werden.
- **Entscheidend für den Erfolg einer kreislauforientierten Rohstoffwirtschaft ist der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur**, die resiliente Wertschöpfungsketten ergibt, die in der EU vollständig integriert sind. Insbesondere im Bereich der Metalle/Metallurgie wird das dauerhaft nur gelingen, wo deren Hüttenprodukte auch in die Produktionsketten münden und nicht exportiert werden müssen.
- Die **ökologisch und ökonomisch sinnvollen Grenzen** bei der Verarbeitung von Sekundärmaterialien müssen berücksichtigt werden.
- Für den Einsatz von Sekundärrohstoffen müssen **gezielte politische Rahmenbedingungen** geschaffen werden, um wirtschaftliche und Akzeptanzhürden zu überwinden (z. B. auch stoffspezifische Quoten, Recycleteinsatz und Nutzung von sekundären Industriemineralen im Baubereich). Die Verleihung des Produktstatus für Sekundärrohstoffe kann deren Akzeptanz, gerade im Baubereich, erhöhen.



Rohstoff- und Datenmanagement

Für das Management und die Verarbeitung komplexer Rohstoffströme (primäre und sekundäre) zu hochwertigen Materialien, Legierungen oder Verbundwerkstoffen sind **systemübergreifende Informationen und fundierte Detailkenntnisse aller Prozesse der Kreislaufwirtschaft** erforderlich, die derzeit weitgehend noch fehlen oder nur dezentral vorliegen. Die Implementierung von realistischen prozesssimulationsbasierten Bewertungsmethoden, die die Kreislaufwirtschaft digital abbilden und die sich an naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten sowie standardisierten Prozessen orientieren, ist dabei eine zentrale Herausforderung. Mit der Schaffung von Informationsschnittstellen können die In- und Output-Ströme über die jeweiligen prozesstechnischen Systemgrenzen hinweg verknüpft werden. Informations- und KI-Technologien bieten hier enorme Möglichkeiten zur Transparenz und Modellierung der Stoffströme inkl. der anfallenden Emissionen wie CO₂. Dabei sind folgende Aspekte relevant:



Die **technologische aber auch die digitale Schnittstelle zwischen Produktdesign, Ressourcentechnologie und Ressourceneffizienz** sowie zwischen **primären und sekundären Rohstoffströmen** sollte klar definiert werden. Produktdesigner, Materialwissenschaftler und Rohstofftechnologien müssen (digital) zusammengebracht werden, um gemeinsam recyclingfähige Produkte zu ermöglichen. Die Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft ist allerdings erst vollumfänglich effizient zu gestalten, wenn auch Konsumenten und Dienstleister in den Informationstransfer mit eingebunden sind. Darüber hinaus müssen gesamtwirtschaftliche Systeme dynamisch steuerbar sein, z. B. über neue softwaredefinierte Ansätze, so dass Stoffstrominhalte auf jeder Ebene digital abbildbar sind. Die Entwicklung eines internationalen Standards, welcher die stoffliche Zusammensetzung und Recyclingfähigkeit von Produkten quantifiziert, wird notwendig sein, um eine Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Dies könnte die Form eines Recyclingindex oder auch eines Produktpasses haben.

Für einen ganzheitlichen Ansatz bei der Sammlung und dem Management von Sekundärrohstoffen sind **drei zentrale Aspekte** relevant, die künftig verstärkt adressiert werden müssen:

- 1. Materialsysteme und ihre Charakterisierung,**
- 2. einzelne Prozesse bis hin zu ganzen Prozessketten sowie**
- 3. deren Modellierung und Bewertung.**

Die meist als „Abfall“ bezeichneten Materialien schließen **alle anthropogenen Ablagerungen**, die Potenzial für Wertstoffe bergen, ein. Bei der Untersuchung solcher Systeme müssen die Bildung von Stoffgemischen und deren Einfluss auf die nachfolgenden technischen Prozessketten berücksichtigt werden. So werden Schnittstellenauswertungen, wie z. B. zwischen der mechanischen Aufbereitung und dem nachfolgenden metallurgischen Prozess, ermöglicht.

Um ein umfassendes (Daten-)Management von Sekundärrohstoffen zu ermöglichen und Stoffströme lenken zu können, ist eine **umfassende und regelmäßige Erfassung** der anfallenden Menge an Produktionsreststoffen, Altschrotten und mineralischen Abfällen, inkl. der jeweiligen Qualitäten, auf deutscher und globaler Ebene elementar. Mit Kenntnis des Anteils der Verarbeitung sowie des Exports bzw. der Verluste können zudem die tatsächlichen Recyclingquoten ermittelt werden. Hinsichtlich der Materialcharakterisierung ist es gerade bei komplexen Sekundärrohstoffen unabdingbar, nicht nur wertvolle Fraktionen zu bestimmen, sondern auch Störkomponenten, die den Erfolg des Recyclings vermindern, für eine gezielte Vorabtrennung zu lokalisieren. Prozessmodellierungen ermöglichen Bewertungen unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten wie Effizienz, Reinheit und Ausbeute eines einzelnen Prozessschrittes oder der gesamten Prozesskette.

Die generellen Herausforderungen für das Datenmanagement und die Implementierung computergestützter Modellierungs- und Bewertungsmethoden sind:

- Die **digitale, systemübergreifende Datenerfassung** mit Detailkenntnissen aller Schritte der Kreislaufwirtschaft inkl. der Primärrohstoffgewinnung muss ausgebaut und bereits vorhandene Datenplattformen (beispielsweise für Hersteller) für Forschungszwecke zugänglich gemacht werden.
- Die **Herstellung von recyclingfähigen Produkten** ist elementar und sollte durch eine enge Vernetzung von Produktdesign, Materialwissenschaften und Rohstofftechnologie realisiert werden.
- Das **Management von Sekundärrohstoffen muss einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen** und neben der Lenkung von Stoffströmen auch alle anthropogenen Ablagerungen in die Betrachtung einschließen.

- Um **sekundäre Stoffströme** lenken und nutzen zu können, muss die Menge an anfallenden Produktionsreststoffen, Altschrotten und mineralischen Abfällen inkl. der Reinheiten und Störkomponenten bekannt sein.

Handlungsempfehlungen

Die verantwortungsvolle Rohstoffversorgung ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die von der Politik mit geeigneten Rahmenbedingungen flankiert werden muss. Im vorangegangenen Text sind die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen auf dem Weg zu einer ressourceneffizienten, klimaneutralen und kreislauforientierten Rohstoffwirtschaft in den einzelnen Stufen des Rohstoffkreislaufes dargelegt, die durch Forschung und Entwicklung bewältigt werden können. In den folgenden Punkten liegen aus Sicht von GERRI wichtige generelle Innovationshebel, um entscheidende Schritte auf dem Weg zu einer verantwortungsvollen Rohstoffversorgung voranzukommen:

- **Digitalisierung und KI** sind Schlüsselemente zur Realisierung einer ressourceneffizienten, klimaneutralen und kreislauforientierten Rohstoffwirtschaft. Nachhaltige Technologie-Entwicklungen in Kombination mit Digitalisierung und KI sowohl für die Methoden und Verfahren in den Kreislaufschritten als auch übergeordnet zur Modellierung der Stoffströme und des gesamten Rohstoffsystems sollte konsequent entwickelt und eingesetzt werden.
- Die **Aufbereitung ist als Schnittstelle** zwischen primären und sekundären Rohstoffen ein entscheidender technologischer Baustein im Rohstoffkreislauf. Es gilt, diesen zu entwickeln und auszubauen, um die vielfältigen Stoffströme sinnvoll zusammenzuführen und einer weiteren Nutzung zuzuführen. Ein Schlüsselement hier ist auch Entwicklung von Multisensorsystemen für die vorgeschaltete Sortierung.
- Die **Primärrohstofferkundung und -gewinnung** – als eine weiterhin notwendige Säule – muss ressourcen- und energieeffizient gestaltet werden.
- Eine **klimaneutrale Rohstoffproduktion** ist in allen Schritten und Verfahren des Rohstoffkreislaufes zu berücksichtigen und mit zu entwickeln.
- Es bedarf **interdisziplinärer und systemischer Forschungsansätze**, um die nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu entwickeln. Bereits in der Ausbildung sind Aspekte des kreislauforientierten und nachhaltigen Wirtschaftens zu integrieren, um möglichst frühzeitig ein entsprechendes Bewusstsein zu etablieren.
- Die **Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie** muss deutlich gestärkt werden, damit die Lücken zwischen Forschung und Anwendung zügig geschlossen werden können.
- In Deutschland müssen **Kompetenzen, Kapazitäten und Infrastrukturen für die nachhaltige Kreislaufwirtschaft** deutlich ausgebaut werden. Hierzu gehört es auch, vorhandene Schlüsseltechnologien, insbesondere auch in der Materialrückgewinnung, im Land zu erhalten. Nur so können neue anthropogene Quellen und der gesamte Inhalt der zu verwertenden Stoffe möglichst lange im Kreislauf gehalten, ein gesamtwirtschaftlicher Nutzen generiert und die Abhängigkeit von Rohstoffimporten abgebaut werden.
- Eine möglichst **vollständige Sammlung von Rest- und Abfallstoffen** ist entscheidend für die zur Verfügung stehende Menge von Sekundärrohstoffen. Bei bspw. Elektroaltgeräten liegt die Sammelquote in Deutschland derzeit bei lediglich 45 Prozent.



- Die **Innovationszusammenarbeit innerhalb Europas** muss intensiviert werden, um integrierte Wertschöpfungsketten für die nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu entwickeln und aufzubauen.
- Ein **internationaler Technologietransfer** ist notwendig, um die globale Entwicklung zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zu beschleunigen und damit auch global die Entkopplung des BIP von den natürlichen Rohstoffen zu erreichen.
- Die **Datenbasis** für die Bewertung sowie Aufbau und Management der Stoffstromsysteme muss geschaffen werden. Diese nützt sowohl der Forschung als auch der Kreislaufwirtschaft.
- Die **faktenbasierte und ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeit** im Hinblick auf Klima-, Umwelt- und Sozialstandards muss integraler Bestandteil beim Aufbau der Kreislaufwirtschaft sein, auch um Umwelt- und Sozialdumping im Rahmen von Importen zu unterbinden.
- Um innovative Technologien und Prozesse für ein ressourceneffizientes, klimaneutrales und kreislaforientiertes Wirtschaftssystem in die Wertschöpfung zu überführen, bedarf es **effektiver Rahmenbedingungen durch die Politik**. Dazu gehören vor allem die Schaffung von geeigneten Anreizsystemen (s. ProgRess III) sowie die Abstimmung zwischen verschiedenen sich hemmenden Rechtssystemen (z. B. Abfallrecht/REACH). Das Ziel muss sein, dass Sekundärrohstoffe gegenüber Primärrohstoffen nicht schlechter gestellt sind sowie die möglichst vollständige Erfassung und Rückgewinnung aller Rohstoffe, vor allem auch der kritischen Rohstoffe, etabliert wird. Auch die Recycling- bzw. Kreislaufführungsfähigkeit von Rohstoffen ist schon am Anfang bei der Herstellung von Produkten zu etablieren. Begleitend muss auch die gesellschaftliche Akzeptanz für die nachhaltige Rohstoffversorgung insgesamt gefördert werden, u. a. auch durch frühe Bildungsangebote und Aufnahme in Lehrpläne.

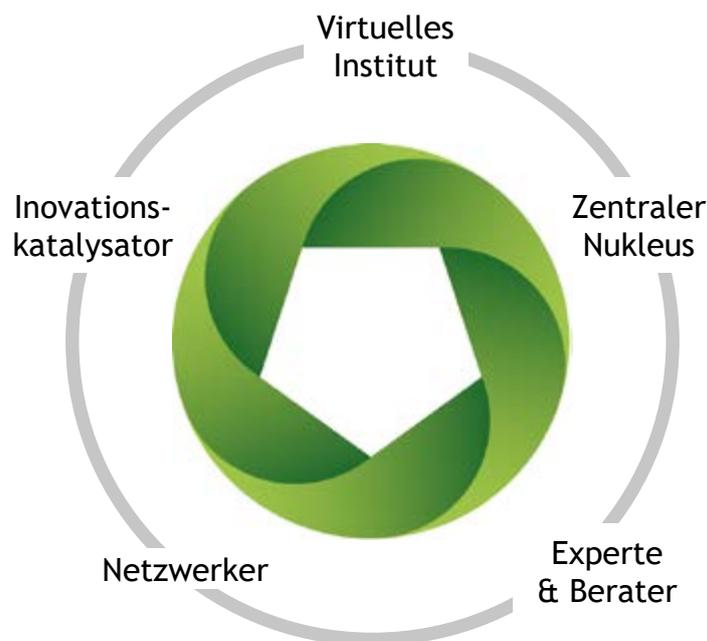


Das Deutsche Forschungsnetzwerk Rohstoffe

GERRI ist das führende nationale Netzwerk von Forschungseinrichtungen, die im Bereich der mineralischen und metallhaltigen Rohstoffe tätig sind. Es wurde 2015 unter dem Namen GERRI – German Resource Research Institute als virtuelles Institut mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von fünf Forschungseinrichtungen des deutschen Rohstoffsektors gegründet. Seit 2020 wird GERRI mit mittlerweile neun Partnern als Deutsches Forschungsnetzwerk Rohstoffe unter Koordination der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe eigenständig weitergeführt.

GERRI vernetzt die deutschen Akteure im Feld der Forschung zu mineralischen und metallhaltigen Rohstoffen. Es dient der Informationsbündelung, Meinungsbildung und Positionierung mit dem Ziel, den Rohstoffbedarf in einer hochindustrialisierten Wirtschaft (Industrie 4.0) zu decken.

Der Rohstoffstandort Deutschland soll als Innovationstreiber für eine technologisch fortschrittliche sowie ressourceneffiziente, klimaneutrale und weitestgehend kreislauforientierte Rohstoffwirtschaft etabliert und so die nationale, europäische und globale Sichtbarkeit der deutschen Rohstoffforschung gestärkt werden.



Kompetenzfelder von GERRI

- Verantwortungsvolle Rohstofferkundung und -gewinnung
- Nachhaltige Prozesstechnologien
- Management von Sekundärrohstoffen



Die Gesichter von GERRI

**Dr. Volker Steinbach**

Vizepräsident der Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe
Leiter der Abteilung Rohstoffe

**Prof. Dr. Jens Gutzmer**

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Direktor des Helmholtz-Institut Freiberg
für Ressourcentechnologie

**Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann**

TU Clausthal
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und
Geomechanik

**Prof. Dr.-Ing. Urs Peuker**

TU Bergakademie Freiberg
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und
Aufbereitungstechnik

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen**

RWTH Aachen University
Institute for Advanced Mining Technologies

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich**

RWTH Aachen University
Institut für Metallurgische Prozesstechnik und
Metallrecycling

**Prof. Dr. Anke Weidenkaff**

Leiterin der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoff-
kreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS



Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und
Ressourcenstrategie IWKS

**Dr.-Ing. Christian Adam**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachbereich Thermochemische Reststoffbehand-
lung und Wertstoffrückgewinnung

**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel**

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon
Ohm | Fakultät Verfahrenstechnik

**Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig**

Bauhaus-Universität Weimar
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde



Impressum

Herausgeber

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Abteilung Rohstoffe
Stilleweg 2
30655 Hannover
E-Mail: GERRI@bgr.de
www.gerri-germany.org

Redaktion

Dr. Hildegard Wilken, Fachbereichsleitung Geologie der mineralischen Rohstoffe
Dr. Martin Erdmann, Koordination GERRI

Layout

Jolante Duba

Stand

Juni 2021