ISSN 0947-5850
ISBN 978-3-86464-253-1

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät • Band 159 Jg. 2023

trafo verlag

Sitzungsberichte

Leibniz-Sozietät der Wissenschaften

Kritische Rohstoffe:
Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas

Kolloquium der Leibniz-Sozietät
der Wissenschaften am 22.03.2023

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

Mit Beiträgen von
Benjamin Busch, Reinhard O. Greiling,
Gerda Haßler, Christoph Hilgers, Jochen
Kolb, Axel Müller, Jasemin A. Ölmez,
Gerhard Pfaff

Band 159

Jahrgang 2023

Die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

ist eine freie Vereinigung von Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaftlern. In ihren Traditionen geht sie zurück auf die im Jahre 1700 gegründete Kurfürstlich-Brandenburgische Societät der Wissenschaften, eine der ältesten wissenschaftlichen Institutionen in Deutschland, sowie auf ihren geistigen Vater und ersten Präsidenten, Gottfried Wilhelm Leibniz. Mit ihr ist sie historisch durch die über Jahrhunderte ununterbrochene Zuwahl ihrer Mitglieder und deren wissenschaftliches Wirken verknüpft.

Die Sozietät, im Jahre 1993 mit Sitz in Berlin konstituiert, baut auf eigenständigen Forschungen ihrer Mitglieder auf und bietet ihnen ein Forum der Diskussion und Publizität. Im Plenum, in den Klassen und Arbeitskreisen pflegen ihre Mitglieder und Gäste besonders den interdisziplinären Diskurs und die Erörterung aktueller Grundprobleme von Wissenschaft und Gesellschaft. Die Sozietät will durch ihre Tätigkeit einen angemessenen Beitrag zum geistigen Leben in unserer Zeit leisten.

Vorstand (Präsidium) der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin

Herbert Hörz; Wissenschaftsphilosophie und -geschichte
Ehrenpräsident

Gerda Haßler; Sprachwissenschaft, Romanistik
Präsidentin

Wolfgang Methling; Veterinärmedizin, Ökologie
Vizepräsident

Dorothee Röseberg; Romanistik, Kulturwissenschaft
Vizepräsidentin

Heinz-Jürgen Rothe; Arbeitspsychologie
Schatzmeister

Gerhard Pfaff; Chemie
Sekretar der Klasse für Naturwissenschaften und Technikwissenschaften

Kerstin Störl; Linguistik, Romanistik, Altamerikanistik
Sekretarin der Klasse für Sozial- und Geisteswissenschaften

Begründet im Jahre 1700
als Brandenburgische Societät der Wissenschaften

LEIBNIZ-SOZIETÄT: SITZUNGSBERICHTE

SITZUNGSBERICHTE
BAND 159 JAHRGANG 2023

LEIBNIZ-SOZIETÄT DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN

Diese Publikation erfolgte mit freundlicher Unterstützung des Senats von 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.leibnizsozietaet.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

Druck: Ortmaier Druck, Frontenhausen

Bezugsbedingungen: Die Reihe „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ erscheint in unregelmäßigen Abständen etwa viermal jährlich.
Bestellungen sowie fortlaufender Bezug bitte über Ihre Buchhandlung oder direkt beim trafo Wissenschaftsverlag Dr. Wolfgang Weist.

Redaktionelle Durchsicht dieses Bandes: Redaktionskollegium der Leibniz-Sozietät

Redaktionsschluss: 15.11.2023
ISSN 0947-5850 ISBN 978-3-86464-253-1

Inhalt

Gerhard Pfaff, Axel Müller, Reinhard O. Greiling 7
Vorwort

Gerda Haßler 17
Eröffnung

Christoph Hilgers, Benjamin Busch, Jasemin A. Ölmez 21
Klima, Rohstoffverfügbarkeit und Energiewende - Deutschland in der Krise?

Jochen Kolb 71
Bedeutung von Russland, Belarus und der Ukraine für die Rohstoffversorgung Deutschlands und der EU

Axel Müller 81
Die gegenwärtige Lage der ukrainischen Metall- und Industriemineralproduktion

Gerhard Pfaff 101
Rohstoffe für die chemische Industrie: Vorkommen, Aufbereitung und Bedeutung

Verzeichnis der Autorinnen und Autoren 127

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *159 (2023), 7–16*

Vorwort

Gerhard Pfaff (MLS), Axel Müller (MLS) und Reinhard O. Greiling (MLS)
(Berlin, Oslo und Karlsruhe)

Am 22. März 2023 veranstaltete die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin das Kolloquium *Kritische Rohstoffe: Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas* auf dem Campus Griebnitzsee der Universität Potsdam. Das Kolloquium stellte die Fortsetzung der vor einem Jahr durchgeführten Veranstaltung *Kritische Rohstoffe, Gewinnung bis Entsorgung: Die Geowissenschaften als Problemlöser* dar. Der vorliegende Band 159 der „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin" vereint die Beiträge dieser Tagung in schriftlicher Form und stellt sie damit der interessierten Leserschaft zur Verfügung.

Durch den Angriff Russlands auf die Ukraine im Jahr 2022 steht die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas vor einer weiteren Herausforderung. Dabei geht es nicht nur um kritische Rohstoffe, sondern auch um die Bereitstellung von Rohstoffen generell. Ein hochindustrialisiertes Land wie Deutschland, das für die Rohstoffversorgung auf Importe angewiesen ist, muss sich in dieser Situation verstärkt um innovative Lösungen bemühen, die gleichzeitig die klimapolitischen Herausforderungen berücksichtigen. Das Kolloquium

Kritische Rohstoffe: Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas hatte sich in diesem Sinne die Aufgabe gestellt, einen Beitrag anhand aktueller wissenschaftlicher Ergebnisse zu leisten.

In ihrer Eröffnung des Kolloquiums verwies die Präsidentin der Leibniz-Sozietät *Gerda Haßler* zunächst auf die im vergangenen Jahr stattgefundene Veranstaltung zu kritischen Rohstoffen, aber auch darauf, dass es bereits eine lange Tradition in der Leibniz-Sozietät gibt, grundlegende Probleme in Natur und Technik aufzugreifen und den Umgang des Menschen und der Gesellschaft damit in ihren Veranstaltungen zu thematisieren. Sie hob hervor, dass mit dem Thema des Kolloquiums ein sehr wichtiges Problemfeld gewählt wurde, dessen Auswirkungen uns täglich begleiten. Dabei führte sie aus, dass wir im Alltag ständig Produkte benutzen, die aus Rohstoffen bestehen, über deren Herkunft wir uns nur selten Gedanken machen. Dabei geht es nicht zuletzt darum, dass die eingesetzten Rohstoffe auf faire Weise gewonnen, verarbeitet und genutzt werden. Ohne eine sichere Rohstoffversorgung besteht für Deutschland und Europa die Gefahr, bei wichtigen Zukunftstechnologien wie der Elektromobilität, der Digitalisierung und der Energiewende an Wettbewerbsfähigkeit zu verlieren. Durch die starke Industrie zählt Deutschland zu den weltweit größten Rohstoffkonsumenten, womit die verantwortungsvolle Gewinnung und die effiziente Nutzung von Rohstoffen, wo immer möglich im Kreislauf, von höchster Wichtigkeit ist. In diesem Zusammenhang verwies *Gerda Haßler* darauf, dass die Anstrengungen zum Aufbau einer widerstandsfähigen Rohstoff-Wertschöpfungskette beschleunigt werden müssen, indem nicht nur in die Gewinnung von Primärrohstoffen, sondern auch in heimische Raffinerieanlagen, Recycling sowie Forschung und Entwicklung zu Rohstoffen investiert wird.

Christoph Hilgers stellte in seinem Vortrag einleitend fest, dass die deutsche Energiewende, die damit assoziierte Mobilitätswende und der resultierende Umbau des exportorientierten Industriestandorts Deutschland einen steigenden Rohstoffbedarf bedingen. Auch der Energie- und Rohstoffbedarf der Welt wird sich aufgrund steigender Weltbevölkerung und steigendem pro-Kopf Verbrauch weiter erhöhen. *Christoph Hilgers* führte anschließend aus, dass China, Indien und Russland 2060 den Wohlstand der EU-4 (Deutschland, Frankreich, Italien, UK) mit ihren dann mehr

als 3 Mrd. Menschen erreichen werden. Fossile Energien und Kernenergie werden 2050 voraussichtlich 60% (95 PWh) der Weltenergie decken und die geförderte Menge an Erdgas wird bis 2050 (47 PWh) weiter steigen (DNV 2019). In Deutschland werden neben der Windkraft (4%), Photovoltaik (1,8%) und Geothermie (0,6%) bislang 77% des Primärenergieverbrauchs durch Kohle, Erdgas und Erdöl gedeckt (Welt 83%). Der Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energie in Deutschland benötigt schwarzstartfähige Kraftwerke und große Untertagespeicher (derzeitiges Speichervolumen 227 TWh vs. Batteriespeicher 0.04 TWh) und weiterhin den Import von Energie. Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energie benötigen noch etwa neunmal mehr Rohstoffmenge (Erdgas vs. onshore Wind) und batteriebetriebene Autos etwa sechsmal mehr Rohstoffmenge als konventionelle Fahrzeuge. Entsprechend ist die deutsche Energiewende eine anspruchsvolle Rohstoffwende. Die Gewinnung von metallischen Erzen wird global von 2,6 Gt (1970), 9 Gt (2019) auf 20 Gt (2060) anwachsen. Dazu müssen die Lagerstätten gefunden und die Jahresproduktion von Gewinnung, Verhüttung und Raffination erhöht werden. Kreislaufführung und Recycling können den Rohstoff-Bedarf nicht vollständig decken. Die verantwortliche Nutzung des geologischen Untergrunds für die Rohstoff- und Energiegewinnung sowie die Energiespeicherung ist für einen Erfolg der geplanten deutschen Energiewende „Klimaneutralität 2045“ essentiell. Deutschland ist zu 100% vom Metallimport und zu 95% vom Erdgasimport abhängig. China, Indien, Südkorea, Japan und die USA verfolgen andere Strategien. Heimische Rohstoff- und Energie-Lagerstätten könnten einen Beitrag leisten, stehen aber vor langen und herausfordernden Genehmigungsprozessen. Die mangelnde Resilienz deutscher Lieferketten äußert sich in den gegenwärtigen und drohenden Engpässen einer bezahlbaren, verlässlichen und sauberen Energie- und Rohstoffversorgung der EU und Deutschlands. Kurzfristige Maßnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit im kommenden Winter scheinen noch immer politischen Restriktionen zu unterliegen und auch mittelfristige Maßnahmen einer bezahlbaren, verlässlichen und sauberen Versorgungssicherheit bleiben herausfordernd.

Der Vortrag von *Hans-Joachim Kümpel* behandelte das in der Gesellschaft kontrovers diskutierte Thema „Fracking“. Der Komplettentfall russischer Erdgaslieferungen innerhalb des letzten Jahres bedeutet für Deutschland die mit Abstand größte Energiekrise seit dem Zweiten

Weltkrieg. Um die Auswirkungen auf Bevölkerung und Wirtschaft zu mindern, geraten ad acta gelegte Optionen eigenständiger Energieversorgung erneut ins Blickfeld. Das gilt auch für die Erdgasförderung aus Ton- bzw. Schiefergestein mittels des Fracking-Verfahrens, wobei der vorrangige Ausbau erneuerbarer Energien nicht in Frage steht. In den EU-Ländern genügt die Erdgasförderung seit vielen Jahren höchsten Sicherheits- und Umweltstandards. In Deutschland wird dies durch die Aufsicht der zuständigen Bergbehörden gewährleistet. Für neue Vorhaben kommen aktuelle Richtlinien und Vorschriften zur Geltung, die der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik Rechnung tragen. Beeinträchtigungen der Grundwassergüte und Erdbebenschäden können praktisch ausgeschlossen werden, andernfalls wären Bohrungen nicht genehmigungsfähig. Zur Deckung der immensen Gasversorgungslücke war die Bundesregierung gut beraten, beschleunigt den Bau von LNG-Terminals anzugehen und in Kauf zu nehmen, dass LNG aus Übersee auf dem Spotmarkt hochpreisig und aufgrund von Verflüssigung und Transport des Erdgases mit einem hohen CO_2-Fußabdruck verbunden ist. Demgegenüber wäre jeder Kubikmeter heimisch geförderten Erdgases ein Beitrag zur Kostensenkung und, so führte es *Hans-Joachim Kümpel* aus, auch zum Klimaschutz. Im Rahmen der Energiewende ist Deutschland auf die „Brücke" Erdgas noch viele Jahre angewiesen. Erschöpfte Fracking-Bohrungen ließen sich jahrzehntelang nachnutzen, zur klimaneutralen, grundlastfähigen Energieversorgung mit Erdwärme. Unter hiesigen Genehmigungsauflagen durchgeführtes Fracking ermöglicht es, in wenigen Jahren einen Großteil der entfallenen Gaslieferungen zu ersetzen, entgegen landläufiger Meinung ohne Kompromisse beim Umweltschutz. Das bestehende Fracking-Verbot entbehrt heute der fachlichen Grundlage, zumal viel dafürspricht, dass dieses Verbot weitgehend aus politischen Gründen erlassen wurde. Die gute Nachricht: Anders als Pipelinegas oder LNG aus Übersee hat heimisches Erdgas keinen Millionen Tonnen schweren CO_2-Rucksack, schont das Klima, erspart jährlich Devisenausgaben in Milliardenhöhe – und senkt die Energiepreise.

Mit dem Statement „Energie ist ein Teil unserer Daseinsvorsorge und die Grundlage für Produktion, Komfort und Wohlstand", begann *Carsten Drebenstedt* seine Ausführungen. Mit der Verfügbarmachung der Energie aus Kohle zur Dampferzeugung wurde die industrielle Revolution in Gang gesetzt und prägt seit dem 19. Jahrhundert bis heute die Energie-

wirtschaft vieler Staaten. Kohle kommt häufig vor und ist deshalb in vielen Ländern verfügbar gemacht worden, oft mit relativ einfachen, sicheren und erprobten Technologien abgebaut und preiswert als Energieträger und in der chemischen Industrie eingesetzt. Zudem sind Kohlereserven noch für Jahrhunderte vorhanden. Die Umweltfolgen der Kohlewirtschaft haben angesichts der rasant steigenden Weltbevölkerung bereits früh die Suche nach anderen technischen Lösungen zur Deckung des wachsenden Energiebedarfs vorangetrieben. Mit der friedlichen Nutzung der Atomkraft schien bereits vor 70 Jahren die neue Energiequelle der Zukunft gefunden. Doch vor allem Sicherheits-Aspekte stellen die Nutzung in Frage, sodass die Kohle bis heute den weltweiten Strommarkt dominiert. Die Umwelteinflüsse der Kohlenutzung haben mit der Erkenntnis der Klimarelevanz, insbesondere durch die Freisetzung von Kohlendioxid im Verbrennungsprozess, erneut die Frage die Notwendigkeit alternativer Energiequellen forciert. Für den Ersatz der Kohle, vor allem in der Stromwirtschaft, ist eine wesentliche Randbedingung zu erfüllen: die Verfügbarkeit 24/7. Da die dafür in Frage kommenden alternativen Quellen Biomasse, Geothermie und Wasserkraft naturbedingt begrenzt sind, müsste der Strombedarf künftig auf dieses, für Deutschland sehr niedrige Angebot, reduziert werden. Solar- und Windenergie unterliegen ebenfalls den natürlichen Bedingungen und stehen zeitlich nur sehr begrenzt zur Verfügung. Ein Ausbau führt zu immer mehr Stromangebot in etwa der gleichen Zeit. Speicher und Stromnetze sind deshalb Grundvoraussetzungen für den Einsatz dieser Technologien. Zudem benötigen sie jede Menge Baurohstoffe, Industrieminerale und Metalle, die pro erzeugte Kilowattstunde deutlich über denen von Kohlekraftwerken liegen. Hinzu kommen u. a. Beschaffungsrisiken und die Umweltauswirkungen zu deren Abbau, Verarbeitung, Transport und Recycling, des Weiteren die Auswirkungen auf die Stromkosten, z. B. für den Produktionsstandort. Import von Strom aus der Sahara, Island und Norwegen wird ebenfalls seit Langem diskutiert – auch hier fehlen die Voraussetzungen und vor allem ein Masterplan (was soll bis wann wie erreicht werden). Bei gleichzeitigem Kohle- und Atomausstieg bleibt für Deutschland zunächst nur das Erdgas für eine 24/7 Verfügbarkeit von Strom und Wärme bis die Infrastruktur für alternative Quellen aufgebaut ist, was sich unter dem sich aktuell veränderten geopolitischen Rahmen als schwer umsetzbar erweist. Eigenes Erdgas ist durch den Bann des

Frackings nur noch in geringen Mengen verfügbar. Importiertes Schiefergas aus Fracking in den USA weist ähnlich hohe Klimarelevanz auf wie heimische Kohle. Die Szenarien drängen dazu, die Rolle der Kohle als wichtige Brückentechnologie zu überdenken. Die Forderungen nach Kohleausstieg vor dem vereinbarten Termin 2038 ohne ein schlüssiges Konzept ist grob fahrlässig. Dabei wurde bereits vor 15 Jahren die CCS-Technologie ernsthaft erprobt, wurden erste Oxyfuel-Kohlekraftwerke betrieben, Pipelines für den CO_2-Transport geplant, was politisch scheiterte. Die Speicherung des CO_2 im tiefen Untergrund hätte den Weiterbetrieb der Kohlekraftwerke ohne Belastung der Atmosphäre für ca. 30 Jahre gesichert. Die technische Option besteht. Übrigens verfügt Deutschland über die saubersten Kohlekraftwerke der Welt, betonte *Carsten Drebenstedt*. Der Export dieser Technologie, würde enorme Mengen CO_2 weltweit einsparen helfen. Auch das ist untersagt. Solange aber hunderte Millionen Menschen in armen Regionen weltweit ohne Strom leben, wird die Kohle ihre Bedeutung behalten.

Harald Elsner begann seinen Vortrag mit den Worten: „Deutschland ist arm an Rohstoffen". Dieser oft und immer wieder gehörte Satz entspricht jedoch, so führte es der Vortragende aus, in seiner Einfachheit nicht der Wahrheit und muss stark relativiert werden. Zwar produziert Deutschland derzeit nur verschwindend geringe Mengen an Metallerzen, kann aber auf ein großes Sekundärangebot an Metallen aus dem Recycling zurückgreifen. Auch bei den Energierohstoffen wird zumindest ein Teil noch in Deutschland gewonnen. Zudem verfügt unser Land weiterhin über bedeutende Vorräte an Braun- und Steinkohlen. Noch wesentlich besser sieht es bei den Baurohstoffen und den Industrieminerale aus. Bei allen Baurohstoffen ist Deutschland ein bedeutender Produzent und verfügt über weitreichende Vorräte. Auch einige Industrieminerale, z. B. Stein- und Kalisalz, Kaolin, Feld-, Fluss- und Schwerspat, Schwefel, Graphit sowie alle Quarzrohstoffe, kommen in Deutschland vor und stehen in Abbau. Gilt dieser Rohstoffreichtum aber wirklich für alle heimischen Minerale, für den gesamtdeutschen Bedarf und auch für eine unbegrenzte Zeit? Am Beispiel der Salze (Stein- und Kalisalz, Sole und Siedesalz) erläuterte *Harald Elsner*, wie autark Deutschland mit seinen heimischen Rohstoffen wirklich ist. Er führte dabei aus wieviel Salz wir produzieren und wozu wir es benötigen. Ebenso ging er auf Fragen wie „sind wir auf zusätzliche Importe angewiesen?" und „wie groß ist die deutsche Abhängigkeit bei unseren heimischen Rohstoffen?" sowie

„welche Auswirkungen hat der Ukrainekrieg?“ ein.

Im Mittelpunkt des Vortrages von *Jochen Kolb* stand die Aussage, dass der Krieg in der Ukraine und die direkte und indirekte Beteiligung einiger Länder einen großen Einfluss auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas mit Rohstoffen haben. Dies resultiert einerseits aus der Zerstörung der industriellen Anlagen und der lokalen Infrastruktur und andererseits aus Sanktionspaketen gegen Länder, Firmen oder Personen. Der Vortrag zeigte auf, bei welchen Rohstoffen die größten Abhängigkeiten bestehen und welche möglichen alternativen Bezugsquellen es gibt. Russland ist ein wichtiger, globaler Rohstoffproduzent für Industrie-, Eisen- und Leichtmetalle sowie für Metalle der Platingruppe. Für diese Metalle gibt es große Lagerstätten und Weiterverarbeitungsindustrien. Nahezu 70% des deutschen Wolfram-Importes stammen aus Russland. Mehr als 40% der deutschen Importe von Nickel und Titan werden aus Russland bezogen. Aluminium, Kupfer, Neon, Krypton und Xenon haben ebenfalls einen signifikanten Anteil. Global ist Russland der wichtigste Produzent von Palladium (ca. 40%) und Platin (ca. 10%) nach Südafrika. Titan, Vanadium und Tellur sind weitere wichtige Rohstoffe, die zu größeren Anteilen aus Russland stammen. Importe aus der Ukraine umfassen vor allem Rohstoffe und Produkte aus Hafnium, Titan und Mangan, die 30-40% Anteil einnehmen. Global ist die Ukraine ein wichtiges Rohstoffland für Titanminerale, die in Russland weiterverarbeitet werden. Kaolin und Mangan sind ebenfalls signifikant. Besonders wichtig ist aber die Produktion von Neon, die weltweit ca. 50% ausmacht. Belarus hat eine signifikante Stahlindustrie und ist global wichtig in der Düngemittelherstellung. Belarus war der drittgrößte Produzent von Kalisalz nach Kanada und Russland. Zusätzlich wird Stickstoff für die Düngemittelherstellung erzeugt. Eisen und Stahlerzeugnisse, Nickel, Kupfer, Titan, Kaolin, Kalisalz und Mangan können relativ leicht über andere Quellen ersetzt werden, da es für diese Rohstoffe keine signifikante Länderkonzentration gibt. Für Kalisalz und Kaolin gibt es bedeutsame Vorkommen in Deutschland. Signifikante Engpässe gibt es also für Wolfram, Palladium, Platin, Hafnium und die Edelgase. Die Edelgase sind ein Nebenprodukt der Stahlindustrie, die in der Ukraine zerstört ist. Für Wolfram ist China dominant, aber es gibt eine signifikante Produktion in Österreich, Spanien, Portugal und Vietnam. Für Platingruppen-Metalle sind Südafrika, Simbabwe und Kanada Alternativen. Es gibt also für die meisten Rohstoffe andere Bezugsquellen. Die Schwierigkeit liegt

einerseits darin, die Kapazitäten der entsprechenden Produktionsstätten schnell zu erhöhen, und andererseits darin, dass häufig Halbzeuge und bestimmte Zwischenprodukte benötigt werden. Es müsste also gegebenenfalls zusätzliche Industrie aufgebaut werden, was vermutlich 10 bis 20 Jahre dauern könnte.

Maren Liedtke begann ihren Vortrag mit Ausführungen zur Gruppe der Seltenen Erden (SE), welche die 15 Elemente der Lanthanoide und Yttrium umfasst. Diese werden in Leichte und Schwere Seltene Erden eingeteilt. Die Seltenen Erden können nur zusammen abgebaut werden. Die gewinnbare Menge einzelner Seltener Erdoxide (SEO) hängt somit von der Lagerstättenzusammensetzung ab. Leichte Seltene Erden kommen in den meisten Lagerstätten deutlich häufiger vor als die schweren Seltenen Erden. Der Rohstoffgruppe der Seltenen Erden gilt wegen ihrer Verwendung für leistungsstarke Permanentmagnete, z. B. für Elektromobilität und Windkraftanlagen, in den letzten Jahren ein zunehmendes Interesse. Durch die hohe Marktkonzentration der Produktion gelten die SE seit langem als kritische Rohstoffe. Der Abbau erfolgt zu über 60% und die Raffinadeproduktion sogar zu rund 90% in China. Die Produktion der Schweren Seltenen Erden findet nur in China statt. Umfangreiche Regulierungsmaßnahmen der chinesischen Regierung führten in den letzten Jahren zu einem strukturellen Wandel des Sektors. Änderungen der wirtschaftlichen Bedingungen, Umweltprobleme oder Genehmigungs- und Handelsbeschränkungen könnten die Verfügbarkeit vieler Seltenerdelemente beeinträchtigen. Der Vortrag gab einen umfassenden Marktüberblick zu den Seltenen Erden und zeigte die wesentlichen Herausforderungen für die Versorgungssicherheit mit diesen Elementen auf.

Axel Müller ging in seinen Ausführungen zunächst darauf ein, dass die Ukraine vor dem Angriff Russlands am 24. Februar 2022 eines der weltweit führenden Länder im Abbau metallischer und nichtmetallischer Rohstoffe war. Die Ukraine besitzt etwa 5% der weltweiten Bodenschätze und gehört zu den Top 10 der Welt in der Eisen-, Mangan-, Titan-, Gallium-, Germanium-, Uran-, Kaolin-, Graphit- und Zirkonproduktion. Fülle und Vielfalt der Mineralien sind auf die Komplexität der ukrainischen Geologie zurückzuführen. Die genannten Rohstoffe werden in der Ukraine aufbereitet und der Großteil der verarbeiteten Rohprodukte wird in die EU und andere Teile der Welt exportiert. Als Folge des Angriffs ging die Mineralproduktion im Jahr 2022 für die meisten Rohstoffe um mehr als 50% zurück. Im Vortrag wurden konkrete

Gründe für den Produktionsrückgang am Beispiel von Eisen, Mangan, Titan, Kaolin und Graphit skizziert. Zudem wurden die Auswirkungen auf die Wirtschaft der europäischen Länder, die auf den Import dieser Rohstoffe angewiesen sind, aufgezeigt.

Den sieben Vorträgen schloss sich eine interessante und intensiv geführte Diskussion zu den in den Präsentationen behandelten Themen an. Hierzu gab es ein Podium, in dem *Christoph Hilgers, Hans-Joachim Kümpel, Maren Liedtke* und *Axel Müller* gemeinsam mit dem vor Ort anwesenden und den per Zoom zugeschalteten Teilnehmenden diskutierten. Die hierbei aufgeworfenen Fragen betrafen u. a. die Akzeptanz des Bergbaus in der Bevölkerung Deutschlands, die mit dem Bergbau verbundenen Probleme für die Umwelt, die Rekultivierung von Braunkohletagebauen in Deutschland, die in der Gesellschaft kontrovers geführte Diskussion zum Thema „Fracking" sowie die grundsätzliche Rolle der Geo-Wissenschaften in der gesellschaftlichen Diskussion und bei der Politik-Beratung.

Nicht alle gehaltenen Vorträge lagen bei Redaktionsschluss dieses Bandes in schriftlicher Form vor. So kann auf die Inhalte der Vorträge von *Hans-Joachim Kümpel, Carsten Drebenstedt, Harald Elsner* und *Maren Liedtke* nur in der hier vorliegenden zusammengefassten Form eingegangen werden. Zur Ergänzung der hier erfassten schriftlichen Beiträge von *Christoph Hilgers, Jochen Kolb* and *Axel Müller* wurde der Beitrag *Rohstoffe für die chemische Industrie: Vorkommen, Aufbereitung und Bedeutung* von *Gerhard Pfaff* mit aufgenommen, der eine enge Beziehung zu den Inhalten des Kolloquiums darstellt. Der Beitrag behandelt die für die Energiegewinnung, aber vor allem auch die für die chemische Industrie wichtigsten fossilen Rohstoffe Kohle, Erdöl, Erdgas sowie regenerative Rohstoffe auf Basis von Pflanzen und Tieren wie Öle, Fette, Zucker, Stärke und Biomasse. Dabei stehen Vorkommen, Aufbereitung und Bedeutung der einzelnen Rohstoffe im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Die Herausgeber des hier vorliegenden Bandes der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät zu Berlin mit den darin zusammengestellten Einzelpublikationen haben das Anliegen, einen wichtigen Beitrag in der aktuellen Diskussion zur Verfügbarkeit und Bereitstellung kritischer Rohstoffe zu leisten. Die Texte dieses Bandes sollen die Inhalte der Vorträge des Kolloquiums *Kritische Rohstoffe: Auswirkungen wachsender geo-*

und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas und die dazu erfolgte wissenschaftlich fundierte Diskussion einem breiten Kreis von an der Rohstoffproblematik Interessierten zugänglich machen.

Für Anregungen, Hinweise und Fragen zu den Ausführungen dieses Bandes stehen die Herausgeber, aber auch die Autoren der Einzelbeiträge gern zur Verfügung (E-Mail-Adressen hierzu finden sich im Autorenverzeichnis).

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *158 (2023), 17–20*

Eröffnung des Kolloquiums „Kritische Rohstoffe: Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas“ am 22.3.2023

Gerda Haßler
(Potsdam, MLS)

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen,

ich freue mich sehr, Sie heute zum 2. Rohstoffkolloquium der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. begrüßen zu dürfen, das in diesem Jahr dem Thema „Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas“ gewidmet ist. Schon im letzten Jahr hat ein Rohstoffkolloquium zum Thema „Kritische Rohstoffe, Gewinnung bis Entsorgung: Die Geowissenschaften als Problemlöser“ stattgefunden, das aus der Arbeit des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt-, Weltraum- und Astrowissenschaften hervorgegangen ist. Die Publikation dazu ist im Dezember als Band 154 der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin erschienen. Mit diesen Kolloquien wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit auf dem Gebiet „Kritische Rohstoffe“ unter Einbeziehung weiterer Wissenschaftler und wissenschaftlicher Institutionen gefördert. Der Arbeitskreis strebt insbesondere die Einbeziehung von Experten an, die an gesellschaftspolitischen Auswirkungen in hochaktuellen Bereichen wie Klimafolgenforschung, Auswirkungen von Naturkatastrophen oder eben der Rohstoffproblematik interessiert sind. Der multidisziplinäre Arbeitskreis konzipiert und organisiert Workshops und Tagungen, die oft unter namhafter internationaler Beteiligung

durchgeführt werden, zu aktuellen Fragen und zur gesellschaftlichen Relevanz der abgedeckten Themen.

Mit dem heutigen Thema haben die Organisatoren der Tagung ein wichtiges Problemfeld gewählt, dessen Auswirkungen uns bis in den Alltag begleiten. Wir nutzen täglich Produkte, die aus Rohstoffen bestehen, ob Smartphone oder Auto, ohne dass wir uns Gedanken machen, wo diese Rohstoffe herkommen und wie die Versorgung damit gesichert werden kann. Bei seinem Besuch der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Februar dieses Jahres sagte Bundeskanzler Scholz „Mit unserem Wissensstand und unseren Absichten können wir dazu beitragen, dass die Rohstoffe, die wir brauchen, auf faire Weise gewonnen, verarbeitet und genutzt werden, auf eine Art und Weise, die gut für die Umwelt ist" (https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/rohstoffversorgung-2166232). Das ist ein hoher Anspruch, der sicher nicht leicht umzusetzen ist.

Ohne eine sichere Rohstoffversorgung drohen Deutschland und Europa bei wichtigen Zukunftstechnologien wie der Elektromobilität, der Digitalisierung und der Energiewende an Wettbewerbsfähigkeit zu verlieren. Denn Rohstoffe stehen am Anfang der industriellen Wertschöpfung und haben damit einen großen Einfluss auf nachgelagerte Wirtschaftsbereiche. Durch seine starke Industrie zählt Deutschland zu den weltweit größten Rohstoffkonsumenten. Damit geht auch die Verpflichtung einher, sich für eine verantwortungsvolle Gewinnung und effiziente sowie auf Kreislaufwirtschaft ausgerichtete Nutzung von Rohstoffen einzusetzen.

Eine detaillierte Analyse der europäischen Rohstoffversorgung hat die EU-Kommission im November 2021 veröffentlicht. Der so genannte dritte Rohstoffanzeiger analysiert die Versorgungsketten, die Wettbewerbsfähigkeit sowie die Handelsströme und konzentriert sich auf vier Hauptrohstoffgruppen: Werkstoffe, Metalle, Holz und Industrieminerallien. Rohstoffe sind demnach nicht mehr nur eine einfache Ware, sondern ein entscheidender Wegbereiter für den grünen und digitalen Wandel. Ihre sichere und nachhaltige Bereitstellung ist entscheidend für die Erhaltung der globalen Wettbewerbsfähigkeit der strategisch wichtigsten Sektoren der Europäischen Union. Die Anstrengungen zum Aufbau einer widerstandsfähigeren Rohstoff-Wertschöpfungskette müssen daher beschleunigt werden, indem nicht nur in die Gewinnung von

Primärrohstoffen, sondern auch in heimische Raffinerieanlagen, Recycling sowie Forschung und Entwicklung investiert wird, die alle für eine sichere Versorgung mit Sekundärrohstoffen entscheidend sind.

Wenn diese Forderungen immer schon zutrafen, wird ihre Notwendigkeit in Krisenzeiten noch verschärft. Laut einer Umfrage des Bundesverbands der Deutschen Industrie führte die Covid-19-Pandemie bei fast 70% der befragten Unternehmen zu mittel- bis langfristigen Beeinträchtigungen, vor allem durch Unterbrechungen in den Lieferketten.

In zahlreichen Gebrauchsgegenständen, wie etwa einem Mikrochip, finden sich metallische Rohstoffe – darunter meist auch Wolfram, Tantal, Zinn und Gold. Diese gelten heute als „Konfliktrohstoffe", weil sie in Regionen abgebaut werden, in denen seit vielen Jahren Krieg herrscht. Trocknet man den Handel der Konfliktparteien aus, so die Hoffnung, würde das auch die Konflikte eindämmen. An der Umsetzung aber scheiden sich die Geister.

Der Krieg in der Ukraine führte zu Verwerfungen an den Rohstoffmärkten, nicht nur bei Öl und Gas, sondern auch bei Metallen. Die Abhängigkeit der Welt, vor allem Europas, von russischen Energierohstoffen ist immens. Die bisher verhängten Sanktionen, freiwillige Boykotte vieler Unternehmen und ihr Rückzug aus dem Russlandgeschäft treiben die Preise für Öl, Gas und Kohle in ungekannte Höhen.

Die Ukraine und Russland machen gemeinsam weniger als zwei Prozent des weltweiten Bruttoinlandprodukts aus. Man könnte also davon ausgehen, dass der Krieg keine größeren Auswirkungen auf die Weltkonjunktur haben sollte. Die Bedeutung beider Länder für die Weltwirtschaft ist aber deutlich größer, als es die reinen Bruttoinlandprodukts-Zahlen erahnen lassen. Denn die Ukraine und Russland sind nicht nur wichtige Energie- und Lebensmittelexporteure. Beide Länder produzieren auch wichtige Inputfaktoren für die Industrie. Russland gehört zu den wichtigsten Nickel- und Palladium-Exporteuren. Die Ukraine ist der weltweit größte Neon-Produzent. Das Gas wurde vornehmlich von zwei Unternehmen in Mariupol und Odessa hergestellt. Seit Kriegsbeginn stockt die Produktion. Längere Wartefristen und steigende Preise scheinen unvermeidlich.

Mit dem zweiten Kolloquium der Leibniz-Sozietät zu rohstoffrelevanten Fragestellungen und Themen werden wichtige geo- und klimapolitische Herausforderungen für die Rohstoffversorgung Deutschlands

und Europas, wie die Risiken und Möglichkeiten des Frackings, Möglichkeiten der Umstellung von der Kohle zur klimaneutralen Energiewirtschaft sowie die Gewinnung seltener Erden aufgegriffen. Mit der Bedeutung von Russland, Belarus und der Ukraine für die Rohstoffentwicklung Deutschlands und der EU und der gegenwärtigen Lage der ukrainischen Metall- und Industriemineralproduktion werden die Auswirkungen großer geopolitischer Herausforderungen behandelt.

Ich danke den Herren Kollegen Reinhard O. Greiling, Axel Müller und Gerhard Pfaff sehr herzlich für die Initiative zur Durchführung des Kolloquiums und für deren Engagement bei den damit verbundenen Vorbereitungen. Ich wünsche allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein interessantes und fruchtbares Kolloquium.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *158 (2023), 21–69*

Klima, Rohstoffverfügbarkeit und Energiewende – Deutschland in der Krise?

Christoph Hilgers, Benjamin Busch, Jasemin A. Ölmez
(Institut für Angewandte Geowissenschaften, Adenauerring 20a, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Adenauerring 20a, 76131 Karlsruhe)

Abstract
CO_2-emissions result in global warming due to combustion of energy carriers such as coal, oil, gas, wood and peat (hydrocarbons), supplemented by other anthropogenic greenhouse gas emissions (CH_4, N_2O, F-gases etc.) due to agriculture and technical processes. CO_2-poor energy converters may reduce emissions if competitive technologies are available on the global market such as wind- and photovoltaic (PV) plants with associated seasonal storage sites, nuclear energy, as well as carbon capture, storage (CCS) or utilization (CCU) technologies. Any energy conversion is associated with an energy loss and reduced efficiency. Favored energy plants for electricity generation from fluctuating wind speed and insolation have a low energy density and a higher raw material- and land consumption. The required raw materials for the energy- and mobility transition must be mined because the required volume is not available from recycling. Thus, climate, energy transition and raw material availability are related. Without the availability of raw materials, new wind- and PV-plants, batteries and electrolyzers cannot be built. This article addresses selected aspects to highlight the global and national challenges, without claiming to be exhaustive. The global impact of anthropogenic emissions into the atmosphere stands vis-à-vis national measures impacting society and economy.

Resümee
Die CO_2-Emissionen bei der Verbrennung von Energieträgern wie Kohle, Erdöl, Erdgas, Holz und Torf (Kohlenwasserstoffe) führen neben weiteren anthropogenen Treibhausgasemissionen (CH_4, N_2O, F-Gase etc.) durch Landwirtschaft und bei technischen Prozessen zu einer Klimaerwärmung. CO_2-arme Energiewandler wie Windkraft- oder Photovoltaikanlagen (PV) mit assoziierten saisonalen Speichern, die Kernenergie, wie auch Technologien zum Auffangen, Speichern (CCS) oder Nutzen (CCU) von CO_2 können die Emissionen reduzieren, wenn entsprechende wettbewerbsfähige Technologien global zur Verfügung stehen. Bei jeder Energiewandlung treten Energieverluste auf und reduzieren die Effizienz. Gleichzeitig sind die favorisierten Energieanlagen zur Stromerzeugung aus fluktuierender Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung wenig energiedicht und gehen mit einem hohem Rohstoff- und Flächenverbrauch einher. Die notwendigen Rohstoffe für eine Energie- und Mobilitätswende müssen aus Lagerstätten gewonnen werden, weil die Mengen durch Recycling nicht gedeckt werden können. Damit stehen Klima, Energiewende und Rohstoffverfügbarkeit in einem Zusammenhang. Ohne Rohstoffverfügbarkeit können keine Windkraft- und PV-Anlagen, keine Batterien und keine Elektrolyseure gebaut werden. In diesem Beitrag sollen einige Aspekte adressiert werden, um die globalen und nationalen Herausforderungen darzustellen, ohne einen Anspruch an Vollständigkeit zu erheben. Die globalen Auswirkungen anthropogener Emissionen in die Atmosphäre stehen heterogenen nationalen Maßnahmen gegenüber, die Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft haben.

Keywords/Schlüsselwörter
Energy trilemma, raw material transition, anthropogenic CO_2-emissions, critical raw materials, geopolitics
Energietrilemma, Rohstoffwende, anthropogene CO_2-Emissionen, kritische Rohstoffe, Geopolitik.

1 Klima

1.1 Deutsche Klimaziele

Das 13. der 17 Nachhaltigkeitsziele der UN betrifft Maßnahmen zum Klimaschutz, zu denen Deutschland sich als eines von 193 Ländern verpflichtet hat. Auch bei der Pariser Klimakonferenz COP21 verpflichtete sich Deutschland, die Erderwärmung deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Die CO_2-Emissionen Deutschlands sind teilweise in Vorketten ausgelagert, in Deutschland werden trotzdem als sechstgrößter Emittent 1,8 % der globalen anthropogenen Emissionen ausgestoßen (675 Mt Stand 2021, Ritchie et al. 2020). Die deutschen Klimaziele wurden mit dem Regierungswechsel ambitionierter und geben eine Reduktion von 65% bis 2030 (im Vergleich zu 1990) und eine Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2045 vor (Bundesregierung 2022).

1.2 Globale CO_2-Emissionen

Die globalen CO_2-Emissionen steigen weiter an, weil die Weltbevölkerung und auch der globale Wohlstand steigen und die Energienutzung durch Verbrennen von Kohlenwasserstoffen global einen hohen Anteil von etwa 80% und in Deutschland von etwa 77% am Primärenergieverbrauch hat. Durch jährlich steigende, anthropogene CO_2-Emissionen (derzeit 36,8 Gt/a) steigt die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre weiter an (im Jahr 2022, IEA 2022) (Abbildung 1). Der größte Emittent ist China mit 11,5 Gt/a anthropogenen CO_2-Emissionen (Ritchie et al. 2020). Eine globale Abnahme während der COVID-19-Pandemie ist nicht erkennbar, da die Lockdowns mit assoziierten wirtschaftlichen Einschnitten nur von wenigen wohlhabenden Ländern durchgeführt werden konnten.

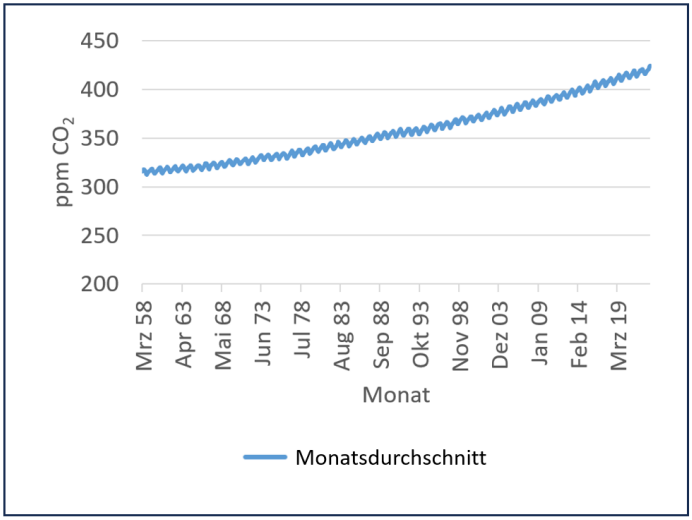


Abb. 1: Monatlicher Mittelwert der CO_2-Konzentration der Atmosphäre am Messpunkt Mauna Loa, Hawaii, wo seit 1958 kontinuierlich gemessen wird. Die Schwankungen beruhen auf den Jahreszeiten (NOAA 2023).

2 Energiewende

2.1 Energiewende = Rohstoffwende

Die Konversion von Energie über notwendige Energiewandler wie Windmühlen und Wasserkraft wird teilweise seit Jahrhunderten genutzt. Heute werden aus kinetischer Windenergie über Windkraftanlagen Strom oder mechanische Energie, aus Lichtquanten (Photonen) über Solarthermie Wärme oder über Photovoltaik-Anlagen Strom, aus potentieller Energie aufgestauten Wassers über Pumpspeicherkraftwerke oder aus kinetischer Energie des Laufwassers über Laufwasserkraftwerke Strom oder mechanische Energie, oder aus elektrischer Energie über Elektrolyseure oder aus der chemischen Energiequelle und dem Rohstoff Erdgas oder Dampfreformierung chemische Energieträger (Wasserstoff) erzeugt.

Die deutsche Energiewende beruht auf dem Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen, der durch eine diskutierte Wasserstoffwirtschaft flankiert werden soll. Die Energiewende geht mit der Mobilitätswende einher, nach der der Neukauf von Verbrennerfahrzeugen in der EU ab 2035 verboten und die Batterietechnologie forciert wird. Diese Energiewende geht mit einem Zuwachs von benötigten Rohstoffen einher, da der Energiesektor aufgebaut werden muss und die wenig energiedichten Windkraft- und PV-Anlagen wie auch die Batterien größere Rohstoffmengen pro Energieeinheit und unterschiedliche Rohstoffe benötigen (Hilgers & Becker 2020) (Abbildung 2). Da andere Länder ebenfalls alternative Energiewandler aufbauen, wird der Wettbewerb um Rohstoffe größer. Entsprechend ist die Energiewende eine Rohstoffwende.

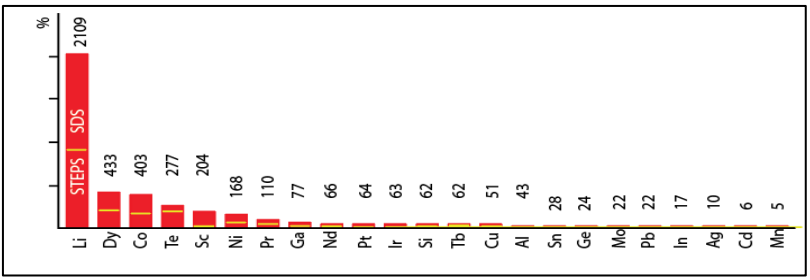


Abb. 2: Globaler Zuwachs an Metallen zwischen 2020 und 2050 für die CleanEnergy Technologien in Prozent. STEPS - gegenwärtige Klimaambitionen werden fortgeschrieben, SDS - verstärkte Klimaambitionen (nach Gregoir et al. 2022 S. 19).

2.2 Energieverbrauch in Deutschland

Der Anteil der Kohlenwasserstoffe Erdgas, Erdöl und Kohle zum Primärenergieverbrauch (PEV) Deutschlands von 3455 TWh beträgt 77% (AGEB 2022a) und ist damit 3% besser als der globale Durchschnitt (Stand 2021). Die sog. erneuerbaren Energien trugen mit 16% zur Energieversorgung bei, wovon Windkraft einen Anteil von 4%, Photovoltaik von 1,8% sowie Geothermie und Umweltwärme einen Anteil von 0,6% am gesamten PEV verzeichneten (Stand 2021). Etwa 50% der sog. erneuerbaren Energien werden durch das Verbrennen von Biomasse (280 TWh, 8,7% des gesamten PEV) gewonnen.

	CO_2e g/kWh Strom	CO_2e g/kWh Wärme		CO_2e g/kWh Strom	CO_2e g/kWh Wärme		CO_2e g/kWh Strom	CO_2e g/kWh Wärme
Kernenergie	22	-	Biomethan (Gülle)	137	128	Wind onshore	10	-
Kernenergie	22 5.1-6.4(1)	-	Tiefengeothermie	183	34	Wind offshore	6	-
Braunkohle	415	443	Erdgas	243	246	Laufwasser	3	-
Steinkohle	390	428	Erdgas mit CCS	92 - 220		Pumpspeicher	25	-
Steinkohle mit CCS	147-469		Erdöl	315	317	Solarthermie	-	22
Pellets	50	22	PV-Kraftwerk	67	-	Elektrowärmepumpe – Luft/Wasser	-	191
Wald-Restholz	37	29	Rapsöl	154	154	Elektrowärmepumpe – geothermisch	-	175
Biogas (Gülle)	208	112						

Tab. 1: CO_2e-Emissionsfaktoren verschiedener Energiequellen zur Stromerzeugung und zur Wärmeerzeugung. Regionale und technische Unterschiede werden weiter differenziert nach Vorkette und direktem Anlagenbetrieb. Bei Wärmepumpen werden neben Vorkette und direktem Anlagenbetrieb auch Emissionen aus fremdbezogener Hilfsenergie berücksichtigt. Bei volatilen Energiequellen werden Backup-Kraftwerke bzw. Energiespeicher nicht berücksichtigt (aus UBA 2019, (1) aus UNECE 2021, s. auch UBA 2016, 2022).

Die Nordstream-Pipeline transportierte vor der Sprengung im September 2022 etwa 537 TWh/a Erdgas nach Deutschland, das dann zum Teil in andere europäische Länder weitergeleitet wurde. Der CO_2-Fußabdruck für die Energieträger unterscheiden sich (UBA 2016) (Tabelle 1).

Im Vergleich zu 2021 wurde in 2022 die Stromerzeugung aus Kernenergie in Deutschland von 6% auf 3% halbiert und 2023 beendet. Zwischen 2021 und 2022 fiel Erdgas um 2,9%, entsprechend stiegen die Erneuerbaren um 1,5%, Kohle um 1,8% und Mineralöle um 2,8% (PEV, Abbildung 3).

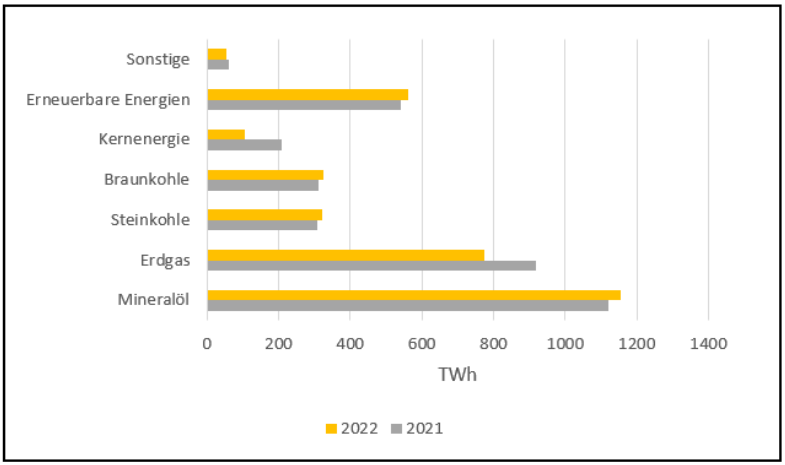


Abb. 3 Der Primärenergieverbrauch Deutschlands fiel von 3455 TWh 2021 auf 3269 TWh 2022 (AGEB 2023).

3 Energiequelle und Rohstoff Erdgas

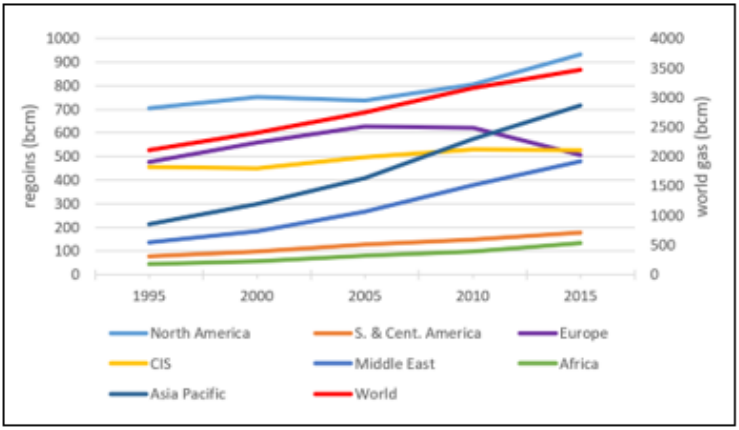
Ein globaler geologischer Mangel an Erdgas ist vorerst nicht absehbar, das Fördervolumen stieg bislang kontinuierlich an (Abbildung 4a). Für die zukünftige Entwicklung der bislang steigenden Förderrate werden unterschiedliche Szenarien ermittelt. Das Accelerated Scenario geht von einer globalen Reduktion der Treibhausgase CO_2e bis 2050 von 75% im Vergleich zu 2019 aus und läge innerhalb einer 2°C globalen Erwärmung entsprechend IPCC; beim NetZero Szenario würde eine globale Treibhausgasreduktion von 95% bis 2050 erreicht und läge bei einer

globalen Temperaturerhöhung von 1,5°C mit entsprechender Reduktion der globalen Erdgasförderung (BP 2023a). Das New Momentum Szenario schreibt die Fortschritte des gegenwärtigen Trends fort und führt zu einer Reduktion von 30% bis 2050 (BP 2023a) (Abbildung 4b).

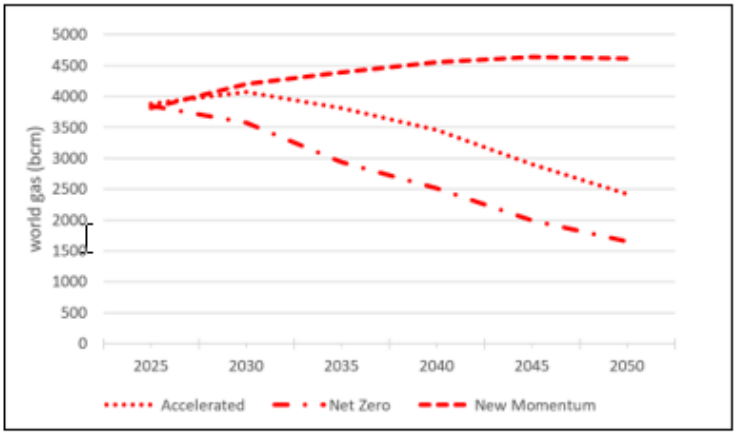
Global wurden 2019 24% der Elektrizität aus Erdgas gewonnen. Erdgas ist bislang nach Kohle die zweitwichtigste Energiequelle für die Konversion zu Strom; 8% des globalen Stroms wurden bereits aus Wind- und Sonnenenergie konvertiert (BP 2023b, Stand 2013).

Erdgas ist u.a. ein Rohstoff für Wasserstoff, ebenso werden die Beiprodukte der Erdgasgewinnung wie Helium und Schwefelwasserstoff verwendet. Die Entschwefelung von Sauergas und Saueröl liefert mehr als 80% des globalen Schwefels, der als Schwefelsäure mit 246 Mio. t pro Jahr für die Herstellung von Phosphordünger, Lithiumionenbatterien und anderen Produkten notwendig ist (Maslin et al. 2022).

Durch die Innovation des horizontalen Bohrens und gezielten Brechens von dichten Tonsteinen (Fracking) Anfang der 2000er Jahre in den USA wird auch aus unkonventionellen Lagerstätten Erdgas produziert. Damit konnten die USA seit 2017 wieder mehr Erdgas exportieren als sie importieren (EIA 2023, Hilgers & Busch 2022 S.7 ff). Neben dem Anstieg von Erdgas werden die Kapazität von Erdgasverflüssigungen und die LNG-Transportkapazitäten global weiter ausgebaut (Hilgers & Busch 2022 S. 38 ff).



(a)



(b)

Abb. 4: (a) Jährlicher Erdgasverbrauch der Regionen und Welt von 1995 bis 2019, bei dem Europa eine gegenläufige, abfallende Entwicklung aufzeigt. CIS – Commonwealth of Independent States (Gemeinschaft Unabhängiger Staaten: Armenien, Aserbaidschan, Belarus, Kasachstan, Kirgistan, Moldau, Russische Föderation, Tadschikistan, Usbekistan). (b) Szenarien des zukünftigen Erdgasverbrauchs. bcm = Mrd. m^3 (BP Energy Outlook 2023a).

3.1 Deutschland

Der Wegfall russischer Gasimporte nach Deutschland kann bislang nicht vollständig durch LNG kompensiert werden. Dadurch ist der Energierohstoff Erdgas, der als Wärmequelle für etwa 50% der deutschen Haushalte, für 50% der Prozessenergie der Industrie (Stand 2021, AGEB 2022b), die Verstromung in Gaskraftwerken und deren Ausbau zur Kompensation von Lastwechseln der fluktuierenden Windkraft und Photovoltaik notwendig ist, verteuert und ggfs. knapp.

Gaskraftwerke mit einer Kapazität von 28 GW nehmen am Strommarkt teil, 31 GW sind installiert (Stand 2021), 3,8 GW befinden sich in Planung oder Bau (Graichen 2022). Gaskraftwerke laufen derzeit mit 2415 Volllaststunden (Stand 2020) (Graichen 2022). Der Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen soll in Deutschland durch steuerbare Erdgaskraftwerke gestützt werden, um bei Dunkelflauten das Netz stabilisieren zu können. Dazu werden zusätzliche Kapazitäten von Gaskraftwerken von 23 bis 43 GW diskutiert (Tagesschau 2021), was etwa einer Verdopplung der bisherigen Kapazität an Gaskraftwerken entspräche. Bislang fehlen jedoch noch die Investitionen in die notwendigen Gaskraftwerke und ggfs. die notwendigen, sicher verfügbaren Mengen an Erdgas. Die Gaskraftwerke sollen wasserstofftauglich sein, die notwendigen Mengen an Wasserstoff gibt es bislang noch nicht. Entsprechend große kommerzielle Elektrolyseure müssen zunächst entwickelt und aufgebaut werden.

Die Preise für Erdgas waren in Europa bereits vor dem Ausbruch des Russland-Ukraine-Konflikts höher als in den USA (Abbildung 5). Daher wird die Herstellung von energie- und rohstoffintensiven Produkten in Deutschland wie Düngemittel, Grundchemikalien, Erzeugnisse der Metallindustrie, reduziert oder eingestellt, sowie ins Ausland verlagert.

Die EU hat Erdgas unter gewissen Voraussetzungen als grün und nachhaltig eingestuft, wenn Gaskraftwerke für die Stromerzeugung bspw. bis 2030 nicht mehr als 270 g CO_2/kWh direkte Emissionen verursachen (weitere Bedingungen siehe EU 2022 Kap. 4.29 ff).

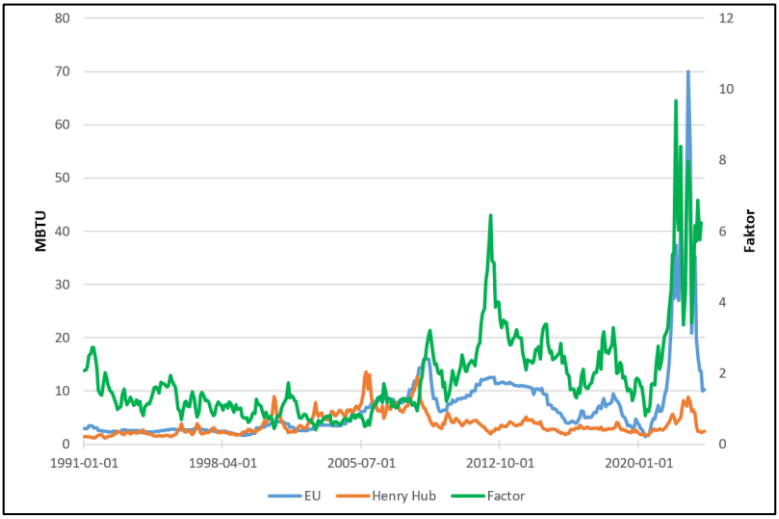


Abb. 5: Monatliche Erdgaskosten in USD pro Energie (in Millionen Britische Thermal Units MBTU) von Januar 1991 bis Juni 2023 (blau – EU, orange – Henry Hub USA). Durch die bis heute anhaltende Schiefergasrevolution in den USA, beginnend um 2010, vergrößerte sich der Kostenfaktor von Erdgas in Europa und ist dort z.Zt. um den Faktor 4 teurer (IWF 2023 a, b).

Erdgas ist als Prozessenergieträger und als Rohstoffquelle für Wasserstoff insbesondere für die chemische Industrie relevant. Der ehemalige VCI-Präsident Kullmann zeigte die benötigte Erdgasmenge an einem Beispiel auf und verglich sie mit einem 1830 km langen, mit Erdgas beladenen Zug, der letzte Waggon in Sevilla und die Lokomotive in Frankfurt stehend. Er fragte sein Auditorium, wie lange die Gasmenge für die deutsche chemische Industrie reichen würde – für sechs Stunden (Heunemann 2022).

3.2 Andere Länder

Die Sprengung der durch die Ostsee von Russland nach Deutschland verlaufenden Nordstream-1 und -2 Pipelines durch unbekannte Attentäter vor Bornholm im September 2022 hat die Erdgaslieferung nach Deutschland und Europa unterbrochen. Zuvor wurde die Lieferung in KW37 2022 vollständig eingestellt. Die vormals in Betrieb befindliche Nordstream-1 hatte eine Kapazität von 55 bcm/a, c. 537 TWh/a. Die

Erdgaslieferungen durch die von Russland durch Belarus und Polen laufende Pipeline Yamal (Kapazität 33 bcm/a) wurde ebenfalls sukzessive zurückgefahren und in KW20 2022 eingestellt. Die von Russland durch die Ukraine nach Ungarn, Slowakei und Österreich verlaufende Pipeline Ukraine Transit / Transgas (Kapazität 120 bcm/a) liefert derzeit, wie im Jahr zuvor, 0,27 bcm/Monat, was etwa 1/3 der Lieferung in 2021 entspricht. Die von Russland über das türkische Gebiet des Schwarzen Meers nach Bulgarien laufende Pipeline Turkstream (Kapazität 31,5 bcm/a) liefert derzeit, wie im Jahr zuvor, 0,32 bcm/Monat, was etwa 20% über den Lieferungen von 2021 liegt (Zachmann 2023).

3.3 Geopolitik und Trends

3.3.1 Europa

Österreich bezog im März 2023 74% und im Mai 50% seines Erdgases über den Ukraine Transit aus Russland (Abbildung 6), wozu die Neutralität des Landes, die als Erste bereits 1968 mit der damaligen Sowjetunion abgeschlossenen Lieferverträge und die nationale Erdöl- und Erdgasfirma OMV, die zu 30% dem österreichischen Staat und zu 25% den Vereinigten Arabischen Emiraten gehört, beitrug (Cohen 2023). Ungarn bezog 2021 6,1 bcm/a Erdgas über die Ukraine Transit / Transgas Pipeline, in den Folgejahren wird auch Erdgas in die Ukraine exportiert (UA Transmission Operator 2023).

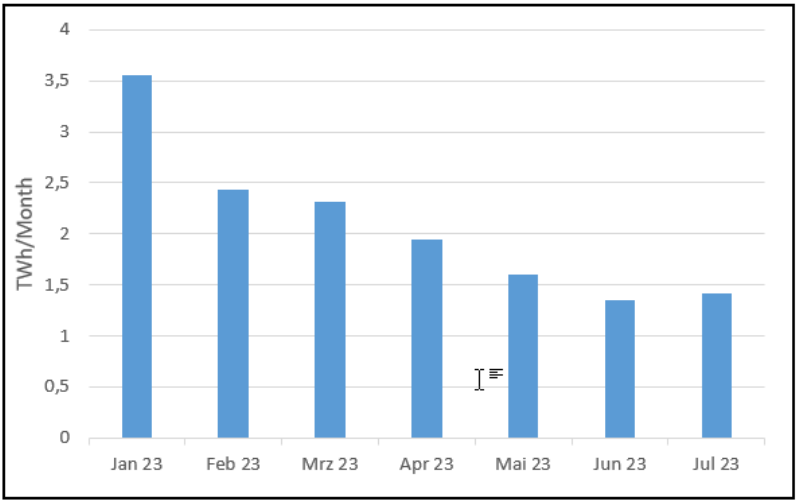


Abb. 6: Einspeisepunkt Baumgarten aus der Slowakei nach Österreich (TAG 2023, measured quantity).

3.3.2 Indien und China

China hat mit Russland nach dem Bau der Power of Sibiria-1 Pipeline (2022 15,5 bcm/a) von den Feldern nördlich von Irkutsk den Bau der zweiten, 2600 km langen Erdgaspipeline Power of Sibiria-2 von den Erdgasfeldern der Yamal-Halbinsel über die Mongolei nach China vereinbart. Der Bau der Pipeline mit einer Kapazität von 50 bcm/a soll 2024 begonnen und 2030 abgeschlossen sein (Herrmann 2023). Die 10 bcm/a Sachalin-Wladiwostok-Pipeline soll 2026 die Gasfelder der Sachalin-Insel mit China verbinden. Ebenso ist eine russische Erdgaspipeline über Kasachstan nach China im Gespräch (Reuters 2023). Weitere asiatische Länder könnten ebenfalls das pipelinegebundene Erdgasnetz nach Russland ausbauen.

3.3.3 Welt

Die Energiepreise für Erdgas sind in Europa seit mehr als einem Jahrzehnt höher als in Nordamerika (Abbildung 5). Dazu hat die durch die Technologie des Horizontalbohrens und Frackings ausgelöste Schiefer-

gasrevolution in den USA beigetragen. Die Verfügbarkeit von preiswertem Erdgas in den USA ermöglicht die Ansiedlung von Industrie, den Export als LNG nach Europa und die geopolitische Neuausrichtung der USA.

4 Energiequelle und Rohstoff Uran

Global wurden 2019 10% der Elektrizität aus der Kernspaltung gewonnen, wobei die freigesetzte Wärmeenergie über Wasserdampf und Turbinen in elektrische Energie gewandelt wird. Kernenergie ist nach Kohle- und Erdgasverbrennung der wichtigste Rohstoff zur Stromerzeugung (BP 2023b, Stand 2013).

Ein geologischer Engpass an Uran ist vorerst nicht absehbar. Sollten die vor allem in China und Indien in Entwicklung befindlichen Thorium-Reaktoren Marktreife erlangen, kämen weitere Rohstoffmengen hinzu, die derzeit bspw. ungenutzt als Nebenprodukt bei der Gewinnung Seltener Erdelemente anfallen (IAEA 2019).

Die EU hat Kernenergie unter gewissen Voraussetzungen, wie „dokumentierte Pläne zum Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Stoffe“, als grün und nachhaltig eingestuft (weitere Bedingungen siehe EU 2022 Kap. 4.29 ff).

4.1 Deutschland

Der Ausstieg aus der Kernenergie wurde unter dem Eindruck des Fukushima Nuklearunfalls vom 11.3.2011 vom Deutschen Bundestag 2011 beschlossen. Die von deutschen Kernkraftanlagen erzeugte Energie von etwa 150 TWh/a wurde ab 2011 sukzessive heruntergefahren (Abbildung 7). Der deutsche Ausstieg aus der Kernenergie wurde mit Abschaltung der letzten drei Kraftwerke Emsland (1988-2023, 1,34 GW elektrische Nettoleistung, ca. 11 TWh/a), Isar-2 (1988-2023, 1,4 GW elektrische Nettoleistung, ca. 12 TWh/a) und Neckarwestheim-2 (1989-2023, 1,31 GW, ca. 11 TWh/a) (Sicherheit in Kerntechnik 2023) Mitte April 2023 beendet.

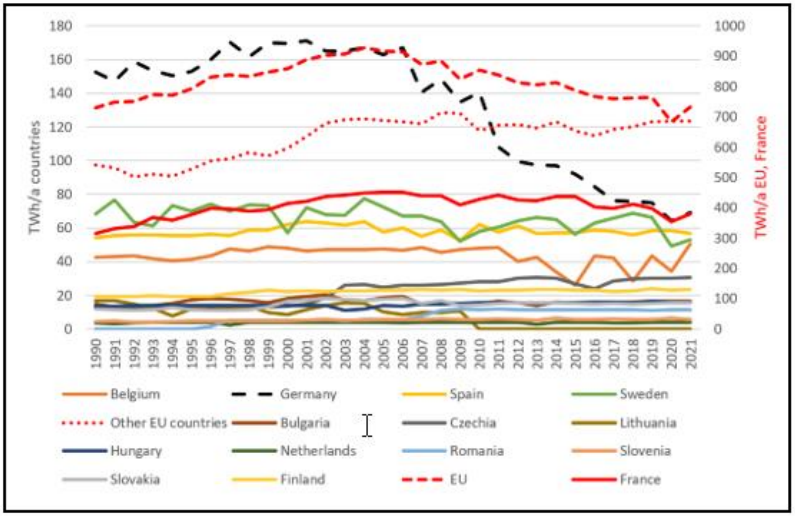


Abb. 7: Produktion von Elektrizität in TWh/a aus Kernkraftanlagen in Europa (Eurostat 2022).

4.2 Andere Länder

In manchen Ländern Europas (Finnland, Schweiz, Schweden und Spanien) wird die Kapazität existierender Kernkraftwerke ausgebaut (Finnland 2022 1,6 GWe), weitere Anlagen befinden sich im Bau und sollen in den nächsten Jahren in Betrieb gehen (Frankreich 2024 1,65 GWe, Slowakei 2024 0,47 GWe, UK 2027 1,72 GWe, UK 2028 1,72 GWe (WNA 2023 a). Weitere Kernkraftwerke in Europa sind in Planung, um existierende Anlagen zu erweitern bzw. wieder in die Kernenergie einzusteigen (Abbildung 8). Der für 2050 prognostizierte Anteil der Kernenergie an der globalen Stromerzeugung reicht von einer im Vergleich zu 2020 konstanten elektrischen Kapazität von 393 GW bis zu 792 GW (IAEA 2021 S. 19).

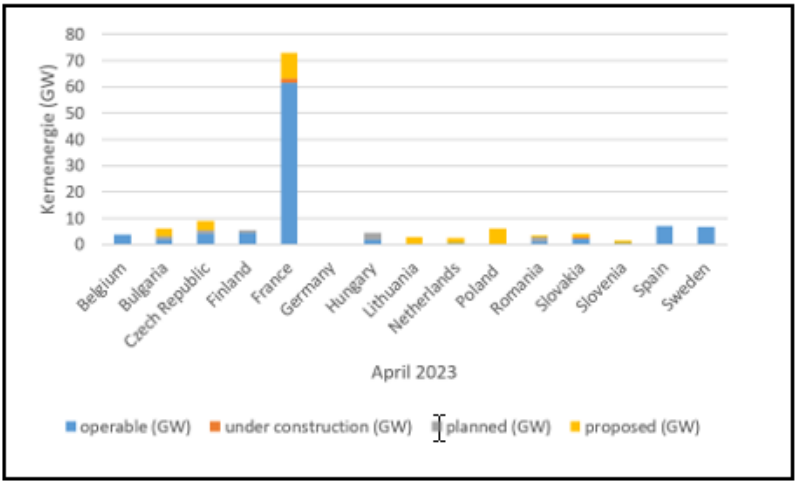


Abb. 8: Beabsichtigte, in Planung und im Bau befindliche Kapazitäten von Kernkraftwerken in der EU (Stand April 2023, WNA 2023 b).

Das weltweit erste fertiggestellte Endlager Onkalo in Finnland soll im Kristallingestein 430 m unter Tage, bei vorliegenden Genehmigungen, 2024 den ersten hochradioaktiven Abfall aufnehmen und sicher für 100.000 Jahre lagern (El-Showk 2022). In Schweden soll der Bau des Endlagers Forsmark in 500 m tiefem Kristallingestein 2024 beginnen und die sichere Lagerung über 100.000 Jahre gewährleisten (SKB 2023). In der Schweiz ist 2022 der Opalinuston im nördlichen Kanton Zürich im Haberstal, ca. 6 km von der Grenze nach Deutschland entfernt, als Endlager für hochradioaktiven Abfall identifiziert worden. Die Suche nach dem am besten geeigneten Standort in der Schweiz wurde 2008 begonnen und 2022 mit der Bekanntgabe des Ortes beendet. In dem Speicher soll ab 2050 in 400-1000 m Tiefe hochradioaktiver Abfall gelagert werden, dessen Zerfall nach 200.000 Jahren auf die Werte eines natürlichen Uranerzes gesunken ist (Nagra 2022).

In Deutschland kann die vom Bund 2017 neu vorgegebene Standortfindung bis 2031 und die ab 2050 geplante Einlagerung hochradioaktiver Stoffe von den beauftragten Behörden nicht eingehalten werden (Süddeutsche Zeitung 2022). Die Standortsuche soll je nach Verlauf bis 2046 oder 2068 andauern (BASE 2022). Eine öffentliche Diskussion zu Gründen und möglicher Effizienzsteigerung, um den hochradioaktiven

Abfall fristgemäß von der Tagesoberfläche sicher in den Untergrund zu verbringen, scheint bislang nicht stattgefunden zu haben. In Deutschland muss die sichere Lagerung für 1.000.000 Jahre gewährleistet werden. Das zukünftige deutsche Endlager muss über 500 Jahre auffindbar und die Behälter für eine mögliche Nachnutzung der radioaktiven Substanzen über 500 Jahre sicher bergbar sein.

4.3 Geopolitik und Trends

4.3.1 Europa

Der im Juli 2023 durchgeführte Putsch in Niger könnte einen negativen Einfluss auf den zukünftigen Export von Uran in die EU haben. Der Import von Uran aus Niger in die EU stieg in den vergangenen Jahren, während der Gesamtimport von Uran in die EU von 12,8 kt (2019) auf 12,0 kt (2021) sank (Abbildung 9). Welche Rolle die russische Wagnertruppe in Niger, wie zuvor beim Putsch in Mali 2021, einnimmt, bleibt unklar (Munzinger 2023). Auch das Nachbarland Mali, in dem die Bundeswehr seit 2013 im Rahmen eines UN-Einsatzes stationiert ist, besitzt Uranvorkommen (BUND 2022 S. 15, WNA 2022). Niger und Mali könnten sich weiter von Europa und den USA distanzieren und die Lieferung von Uran reduzieren.

4.3.2 Indien und China

Indien und China bauen Kernkraftanlagen zur Sicherung des Energiebedarfs und Abwendung des Klimawandels signifikant aus (z.B. Gupta et al. 2021). Indien plant den Ausbau von Kernkraftanlagen mit derzeit 7.480 MW auf 22.480 MW bis zum Jahr 2031 (Enerdata 2023b). China betreibt Kernkraftanlagen mit einer Kapazität von 53.286 MWe und baut derzeit 24.296 MWe (WNA 2023c). Beide Länder entwickeln neue Technologien wie den Thorium-Reaktor (z.B. Mallapaty 2021).

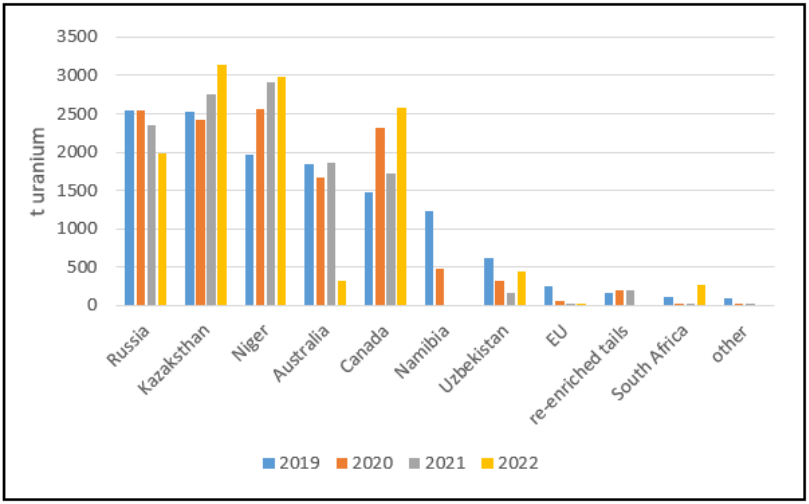


Abb. 9: Lieferländer von Uran in die EU (im Jahr 2022 werden Südafrika und Namibia zusammen unter Südafrika geführt, ESA 2020, 2021, 2022, 2023).

5 Energiequelle und Rohstoff Kohle

Thermische Kohle wird zur Wärmeerzeugung und Verstromung, Kokskohle als Reduktionsmittel wie bei der Verhüttung von Eisenerz zur Stahlherstellung verwendet. Ein geologischer Mangel an Kohle ist vorerst nicht absehbar. Steinkohle wird global gehandelt, Braunkohle wird aufgrund der geringeren Energiedichte lokal verstromt.

Global wurden 2019 38% der Elektrizität aus Kohle gewonnen, diese ist derzeit vor Erdgas der wichtigste Rohstoff zur Stromerzeugung (BP 2023b, Stand 2013).

5.1 Deutschland

Der Abbau von Steinkohle wurde in Deutschland 2018 beendet, der Braunkohletagebau soll 2030 oder 2038 beendet werden. Neben der Kohleverstromung wird Steinkohle als Rohstoff bspw. für die Stahlerzeugung nach der EU-Sanktion gegen Russland bspw. aus Australien, Kolumbien und den USA importiert. Obwohl importierte Steinkohle bei

der Verstromung einen höheren Emissionswert als Erdgas hat, stieg der Steinkohleimport nach Deutschland seit 2020 an (Abbildung 10).

Kohlekraftwerke am Strommarkt halten eine Kapazität von 35 GW vor (Stand 12/2022, Steinkohle 18 GW, Braunkohle 17 GW); bis 2025 sollen davon c. 12 GW stillgelegt werden, während 2,4 GW im Bau oder Probebetrieb sind (Bundesnetzagentur 2023).

Die Rauchgasentschwefelung (REA) der Kohlekraftwerke liefert rund 50% des in Deutschland benötigten Gipses. Der deutsche Ausstieg aus der Kohleverstromung führt zu einem Wegfall des REA-Gipses, der durch neue Bergwerke und mögliche Potentiale des Recyclings ersetzt werden muss. Ebenso wird die Steinkohleflugasche als Betonzusatzstoff gegen die zersetzende Alkali-Kieselsäure-Reaktion verwendet, für die Alternativen gesucht werden müssen.

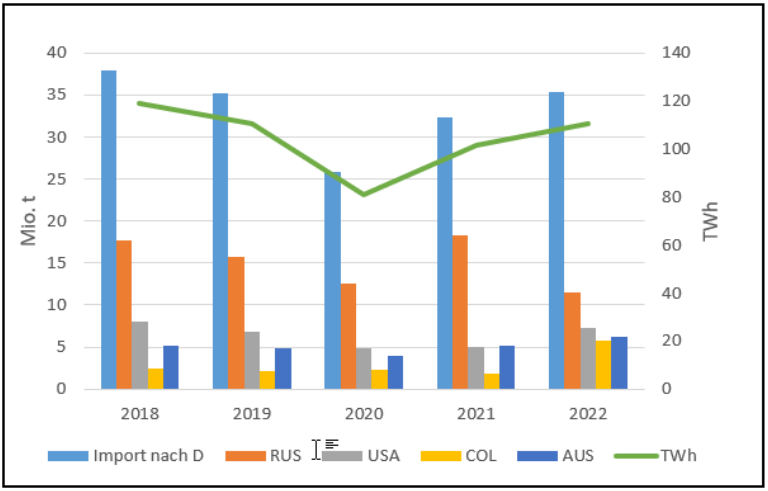


Abb. 10: Steinkohleimport in Millionen Tonnen nach Deutschland 2018 – 2022 (Balken). Energiegewinnung aus Steinkohle unter der Annahme eines Heizwertes von 27,5 GJ/t (grüne Linie) (Destatis 2023a, b).

5.2 Andere Länder

Die Kohleverstromung deckt etwa 40% des global erzeugten Stroms. Das Kohlefördermaximum der Welt (peak coal, Braun- und Steinkohle)

wurde mit 7,98 Gt/a im Jahr 2013 identifiziert, ist jedoch nach temporären Rückgängen ab 2020 auf ein Allzeithoch 2022 von 8,69 Gt/a gestiegen (Abbildung 11).

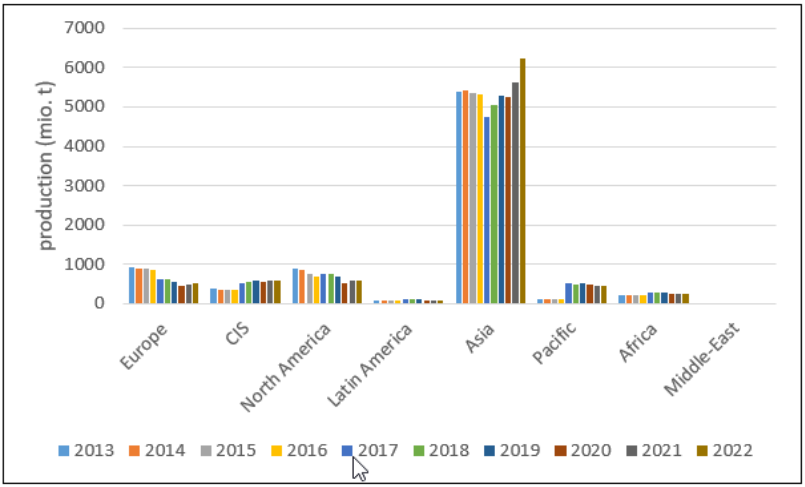


Abb. 11: Globale Produktion von Braun- und Steinkohle. CIS – Commonwealth of Independent States (Gemeinschaft Unabhängiger Staaten: Armenien, Aserbaidschan, Belarus, Kasachstan, Kirgistan, Moldau, Russische Föderation, Tadschikistan, Usbekistan) (Enerdata 2023a).

Der Bau von Kohlekraftwerken wird insbesondere in Asien forciert (Abbildung 11). Nach geplanten und im Bau befindlichen Kapazitäten von 479 GW in 2021 stieg der Wert 2022 auf 537 GW, vor allem durch Ausbau von Kapazitäten in China (Global Energy Monitor 2023a, b). China plant und baut derzeit Kapazitäten von 255 GW, Indien 36 GW (Stand April 2023, Abbildung 12).

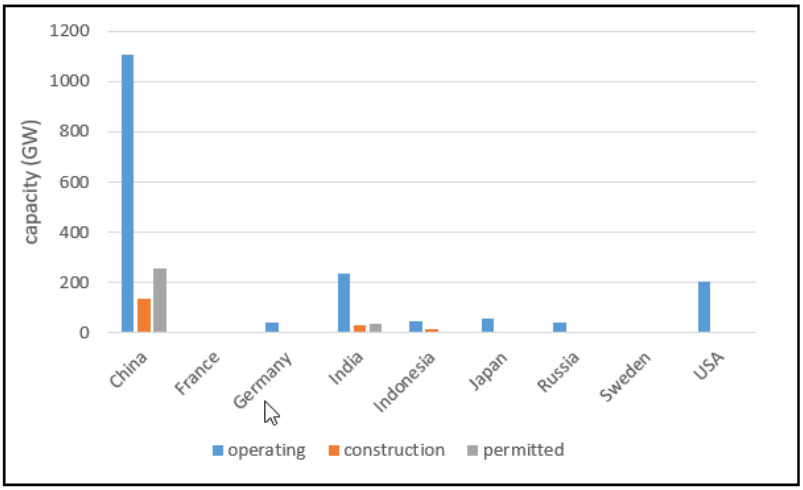
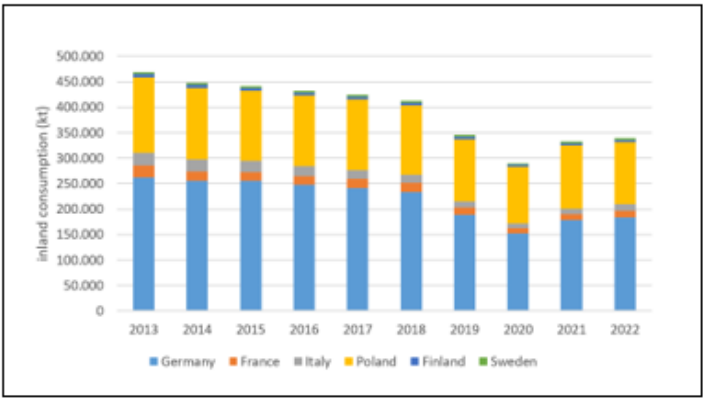


Abb. 12: Globale Kapazität von Kohlekraftwerken im Betrieb (blau), im Bau (orange) sowie angekündigt und geplant (grau) (Enerdata 2023a).

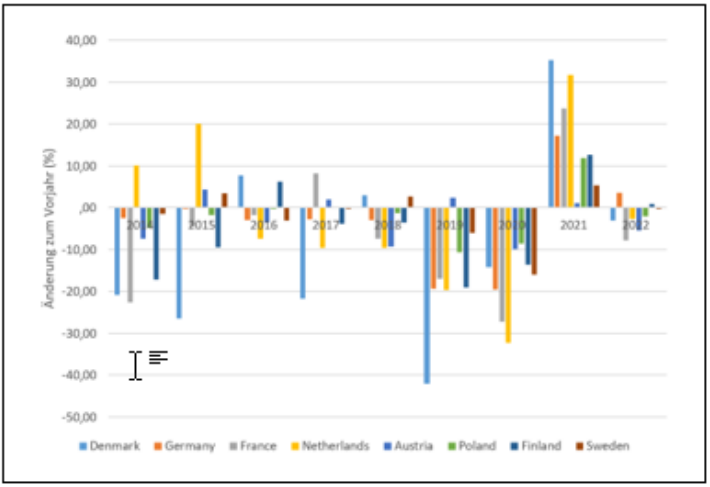
5.3 Geopolitik und Trends

5.3.1 Europa

Wie in zahlreichen anderen Regionen der Welt wird die Verstromung thermischer Kohle in Europa reduziert. Durch den Ausbruch des Russland-Ukraine Konflikts am 24.2.2022 und der bislang nicht aufgeklärten Sprengung der Pipelines Nordstream-1 und -2 in der Ostsee vor Bornholm importiert und verstromt Europa, vor allem Deutschland, mehr Kohle (Abbildung 13). Mit 496,8 Mio. t Kohle 2022 stieg der Verbrauch im Vergleich zu 2020 in der EU-27 um 16%, in Deutschland um 21,4%, in Polen um 9,7% (Eurostat 2023).



(a)



(b)

Abb. 13: (a) Verbrauch an Kohle ausgewählter Länder zeigt einen Anstieg seit dem Russland-Ukraine Konflikt. (b) Änderung des Kohleverbrauchs ausgewählter Länder. Negativ – Abnahme des Kohleverbrauchs.

5.3.2 Indien und China

Indien und China sind wie Deutschland auf den Import von thermischer Steinkohle (thermal coal) und Kokskohle (coking coal) angewiesen. Größte Exporteure von thermischer Kohle und Kokskohle sind Indonesien, Australien und Russland (IEA 2023). China importierte 2019 300

Mio. t, davon 80 Mio. t aus Australien. Nach der Ankündigung des damaligen australischen Premierministers, eine unabhängige Kommission mit der Herkunft des COVID-19 Virus und der Rolle Chinas einzusetzen, veranlasste China einem informellen Bann australischer Steinkohle und anderer australischer Produkte. China verlegte die Lieferketten auf Russland und die Mongolei, während Australien einen Teil des Ausfalls durch erhöhte Exporte nach Japan, Südkorea und Indien kompensieren konnte (Peng 2023). Seit dem Regierungswechsel in Australien werden die chinesischen Zölle auf australische Produkte wieder normalisiert (Barkhausen 2023), der zwischenzeitlich weggefallene Export australischer Kokskohle nach China konnte sich bislang nicht gegen die neuen, preiswerter produzierenden Lieferländer Chinas normalisieren (Russel 2023).

6 Rohstoffverfügbarkeit

Obwohl bislang kein geologischer Mangel an Rohstoffen erkennbar ist, sind effiziente Maßnahmen zu einer resilienten Rohstoffversorgung geboten (Hilgers & Becker 2020, Hilgers et al. 2021). Die Herausforderungen einer resilienten Rohstoffversorgung nehmen zu. Der Wettbewerb, geostrategische Maßnahmen und geopolitische Entwicklungen schränken die Rohstoffverfügbarkeit ein.

China schränkte 2009 den Export seiner Seltenen Erden ein, um den illegalen Bergbau im Land zu reduzieren bzw. die territorialen Streitigkeiten mit Japan durch einen Exportbann zu beeinflussen (Nguyen 2023), was bis 2012 zu stark erhöhten Preisen führte (BGR 2021, BGR 2011, DERA 2014).

China schränkte 2021 den Export von Magnesium ein, weil die energieintensive Industrie in der chinesischen Provinz Shaanxi die Klimaziele nicht erreichte. Der Preis vervielfachte sich, pendelte sich dann aber bis Juli 2022 auf höherem Niveau ein (Trading.com 2023). China liefert 85% des auf dem Weltmarkt verfügbaren Magnesiums, das insbesondere für Aluminiumlegierungen notwendig ist.

China sprach 2023 für Gallium und Germanium ab 01. August 2023 ein Exportverbot aus, nachdem verschiedene Länder wie USA, Japan und die Niederlande (mit den Maschinen von ASML Weltmarktführer der Chip-Lithographie) die Exportauflagen nach China für Chips und entsprechende Maschinen erhöht hatten (Ziady & Xu 2023).

Indonesien veranlasste ein Exportverbot von Nickel im Jahr 2020 und beabsichtigt ein Exportverbot von Bauxit, Kupfer und Zinn, um die nachgelagerte Wertschöpfung im eigenen Land auf- und auszubauen.

Russlands Rosatom und Chinas Citic tätigten im Juni 2023 eine Investition von 1,3 Mrd. € in die bolivianische Lithiumförderung, China könnte bis 2025 über 30% der globalen Lithiumgewinnung kontrollieren (Handelsblatt 2023). Der im Dezember 2018 mit Regierungsvertretern Boliviens und Deutschlands abgeschlossene Vertrag des baden-württembergischen Unternehmens ACI Systems aus Zimmern ob Rottweil wurde durch den damaligen bolivianischen Präsidenten, aufgrund von Protesten in Bolivien, im November 2019 gekündigt. Ebenfalls 2019 erhielt die chinesische Xinjiang TBEA Group Co Ltd den Zuschlag für ein 2,3 Mrd. USD Lithium-Projekt in Bolivien (Ramos 2019).

Durch die hohen Erdgaspreise in Europa sind die Produktionskosten zahlreicher europäischer Hütten auf dem Weltmarkt nicht mehr konkurrenzfähig und die Produktion musste 2022 gedrosselt oder eingestellt werden. Durch den Wegfall von Hütten wird auch die Recyclingkapazität reduziert. Deutschlands größte Hütte für Primäraluminium, das Uedesheimer Rheinwerk der Speira GmbH, eine Tochter der Privatkapitalgesellschaft KPS (KPS Capital Partners, New York), wie auch andere Betriebe der Metallindustrie, wurden in den langfristigen Wartungs- und Instandhaltungsmodus überführt. Sie werden ggf. dauerhaft geschlossen und die außereuropäische Produktion wird entsprechend erhöht.

6.1 Europa

Die EU bemüht sich, mit dem Critical Raw Materials Act (CRMA) eine Nutzung eigener Ressourcen und eine Diversifizierung zu erreichen. Bis 2030 soll der EU-Verbrauch an strategischen Rohstoffen (Tabelle 2) zu 10% in der EU gefördert, zu 40% in der EU prozessiert und zu 15% durch Recycling sichergestellt werden (EU 2023a). Bei der Diversifizierung sind nur bis zu 65% des EU-Verbrauchs aus einem einzigen Lieferland für jeglichen Schritt (Bergbau, Verhüttung, Raffination) zulässig (EU 2023b). Als Kriterium für strategische Rohstoffe wird von der EU (2023c) definiert „… Bedeutung eines Rohstoffs für den grünen

und den digitalen Wandel sowie für Verteidigungs- und Raumfahrtanwendungen …".

Ein kritischer Rohstoff unterliegt einer wirtschaftlichen Bedeutung und einem erhöhten Versorgungsrisiko. Demnach zählen alle strategischen Rohstoffe auch als kritische Rohstoffe (Tabelle 2).

Durchschnittlich sind 16,9 Jahre von der Entdeckung bis zur Aufnahme des Betriebs notwendig (Statista 2023); die Dauer hängt von Land, Rohstoff, Marktentwicklung und anderen Faktoren ab (Khan et al. 2016). Entsprechend sind die Ziele des CRMA gut, aber in dem Zeitrahmen für alle benannten Rohstoffe kaum umsetzbar.

Kritische Rohstoffe der EU, Stand 2023
a) Antimon (b) Arsen (c) Bauxit (d) Baryt (e) Beryllium (f) Bismut (g) Bor (h) Kobalt (i) Kokskohle (j) Kupfer (k) Feldspat (l) Flussspat (m) Gallium (n) Germanium (o) Hafnium (p) Helium (q) Schwere seltene Erden (r) Leichte seltene Erden (s) Lithium (t) Magnesium (u) Mangan (v) Natürlicher Graphit (w) Nickel – Batteriequalität (x) Niob (y) Phosphorit (z) Phosphor (aa) Metalle der Platingruppe (bb) Scandium (cc) Siliziummetall (dd) Strontium DE 4 DE (ee) Tantal (ff) Titanmetall (gg) Wolfram (hh) Vanadium
Strategische Rohstoffe der EU, Stand 2023
(a) Bismut (b) Bor – metallurgische Qualität (c) Kobalt (d) Kupfer (e) Gallium (f) Germanium (g) Lithium – Batteriequalität (h) Magnesiummetall (i) Mangan – Batteriequalität (j) Natürlicher Graphit – Batteriequalität (k) Nickel – Batteriequalität (l) Metalle der Platingruppe (m) Seltenerdmetalle für Magnete (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm und Ce) (n) Siliziummetall (o) Titanmetall (p) Wolfram

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

6.2 Deutschland

Die Bundesregierung ist bemüht, die Rohstoff-Engpässe zu beseitigen. Die Vertreter der Bundesregierung haben nicht zuletzt durch Reisen in rohstoffreiche Länder erfahren, wie stark Mitbewerber um Rohstoffe in den jeweiligen Ländern verankert sind und welche nationalen geopolitischen Maßnahmen Förderländer und Rohstoffkunden verwenden. Die

potentiell kritischen Rohstoffe für Deutschland wurden ebenfalls erneut evaluiert (Tabelle 3).

Geringes Risiko (Risikogruppe 1), Stand 2023, unbedenkliche bis mittlere Länderkonzentration, unbedenkliches bis niedrig gewichtetes Länderrisiko			
		neu hinein	heraus
Bergwerksprodukte:	Metalle: Gold, Kupfer, Nickel, Silber, Titan Industrieminerale: Bentonit, Bims, Gips/Anhydrit, Granat, Kaolin, Steinsalz, Talk, Zeolith	Bims, Granat & Talk (vorher RG 2)	Eisenerz, Glimmer und Zirkon -
Raffinadeprodukte:	Ferronickel	Ferronickel	Ferromangan Raffinade-nickel & Selen (nun RG 2)
mittleres Risiko (Risikogruppe 2), Stand 2023, mittlere Länderkonzentration, mittleres gewichtetes Länderrisiko sowie hohe Länderkonzentration, niedriges gewichtetes Länderrisiko			
Bergwerksprodukte:	Metalle: Aluminium (Bauxit), Beryll, Blei, Eisen, Lithium, Mangan, Molybdän, Zink, Zinn Industrieminerale: Baryt, Diamanten, Feldspat, Glimmer, Kalisalz, Perlit, Phosphat, Pyrophyllit, Vermiculit, Zirkon	Bergwerksprodukte: Eisenerz, Glimmer, Zirkon (vorher RG 1), Perlit (vorher RG 3)	Bims, Granat &Talk (neu in RG 1)
Raffinadeprodukte:	Blei, Kadmium, Kupfer, Ferromangan, Nickel, Rhenium, Selen, Zink	Ferromangan, Raffinadenickel, Selen (vorher RG 1)	Ferrochrom (nun RG 3)

hohes Risiko (Risikogruppe 3), Stand 2023, mittlere Länderkonzentration, hohes gewichtetes Länderrisiko sowie hohe Länderkonzentration, mittleres bis hohes gewichtetes Länderrisiko			
Bergwerksprodukte:	Metallische Erze: Antimon, Chrom, Iridium, Kobalt, Niob, Palladium, Platin, Quecksilber, Rhodium, Ruthenium, Seltene Erden, Tantal, Vanadium, Wolfram Industrieminerale: Borminerale, Minerale der Disthen-Gruppe, Fluorit, Graphit, Magnesit, Strontiumminerale, Wollastonit Kokskohle	Iridium & Ruthenium (vorher nicht gelistet)	Perlit (nun RG 2)
Raffinadeprodukte:	Aluminiumoxid/-hydroxid, Raffinadealuminium, Hüttenblei, Roheisen, Rohstahl Raffinadeproduktion von Kobalt, Magnesium, Seltenen Erden, Silizium, Titan und Zinn Ferrolegierungen: Ferrochrom, Ferromangan + Ferrosilikomangan, Ferromolybdän, Ferroniob als Beiprodukt gewonnenen Metalle: Gallium,	Ferrochrom	

	Germanium, Indium, Wismut		

Tab. 3: Liste der potentiell kritischen Rohstoffe Deutschlands (DERA 2023).

Die notwendigen Rohstoffe für Deutschlands Industrie, die Mengen (wieviel), Raten (wie schnell) und Kosten (wie teuer) für die deutsche Energiewende und die geplante Mobilitätswende sind bekannt. Die von der Politik gesetzten Zeitrahmen für die deutsche Klimaneutralität 2045 und für das Verbrennerverbot für Neukäufe in der EU ab 2035 sind ebenfalls gesetzt. Die nationalen und europäischen Ziele sind in dem vorgegebenen Rahmen im Hinblick auf den Rohstoffbedarf kaum umsetzbar, wenn der Wirtschaftsstandort Deutschland seinen bisherigen Industrieanteil mit einem großen Beitrag an Wertschöpfung und Wohlstand halten möchte.

7 Diskussion

7.1 Energietrilemma

Die Herausforderung einer erfolgreichen Energie- und Mobilitätswende ist die Lösung des Energietrilemmas. Das Energietrilemma besteht aus bezahlbarer (affordability = minimizing the cost of energy to consumers), verlässlicher (security = security and reliability of energy supplies) und sauberer Energie (sustainability = decarbonising energy) (UK Parliament 2023). Das Energietrilemma wird auch als soziale Gerechtigkeit, Energieversorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit beschrieben (WEC 2023).

Ohne bezahlbare, verlässliche und verfügbare Energie können keine Rohstoffe gewonnen und verhüttet werden, die für den Bau neuer Produkte oder Batterien für die deutsche Energie- und Mobilitätswende notwendig sind. Die EU hat mit dem Critical Raw Materials Act CRMA (EU 2023) die Notwendigkeit heimischer und internationaler Exploration und Verhüttung erkannt. Auch das notwendige Recycling von Schrotten soll dank des CRMA ausgebaut werden, ist aber ebenfalls energieintensiv. Die Ziele des CRMA bis 2030 sind in der Breite kaum erreichbar.

Ob die Umstellung des deutschen Energiesystems in angemessener Zeit zu kostengünstigen, wettbewerbsfähigen Strom- und Wasserstoffkosten führt und sich ein attraktiver Standortfaktor für die derzeitige Industrie entwickelt, wird die Zukunft zeigen. Nachdem bereits die Kernenergieerzeugung 2023 beendet wurde, große Kapazitäten an Kohlekraftwerken bis 2025 und endgültig 2038 abgeschaltet werden sollen und bislang keine wesentlichen neuen Kapazitäten an Gaskraftwerken, Windkraft-, PV-Anlagen, Speicher- und Netzinfrastruktur gebaut wurden, ist die bezahlbare, verlässliche und saubere Energieversorgung Deutschlands eine Herausforderung. Die Stromkosten Deutschlands gehören trotz umfangreicher Förderung durch das Erneuerbare Energien Gesetz EEG (2021 30,9 Mrd. €, Záboji 2021) zu den höchsten weltweit (Stand 2019, IEA 2020).

Grundsätzlich wäre verfügbarer Strom aus fluktuierender Windkraft und Photovoltaik mit großen saisonalen Speicherstrukturen, die im Untergrund Deutschlands gebaut werden könnten, möglich. Saisonale Untertagespeicher könnten den diskutierten Wasserstoff als chemischen Energieträger, der bisher i.W. aus Erdgas gewonnen wird, im TWh-Maßstab vorhalten. Vorerst sind jedoch steuerbare (Gas?) Kraftwerke, die zunächst noch gebaut und mit Erdgas versorgt werden müssten, notwendig, bis eine großskalige Elektrolyse entwickelt, ausreichend bezahlbarer Wasserstoff und saisonale Untergrundspeicher verfügbar und bezahlbar sind.

7.2 Klima und Umwelt

Die externen Faktoren Russland-Ukraine-Konflikt, Beendigung pipelinegebundener Erdgaslieferungen nach Deutschland (mit bislang nicht aufgeklärter Sprengung der Nordstream-Pipelines) sowie die nationale Entscheidung, die letzten drei deutschen Kernkraftwerke stillzulegen, bedingen eine Umstrukturierung der deutschen Energieversorgung.

Über die neuen deutschen LNG-Anlandepunkte wird LNG-Gas importiert, das vor allem durch die Verflüssigung auf -162°C einen hohen CO_2-Fussabdruck von c. 20% der transportierten Energiemenge hat. Die heimische Gewinnung von Erdgas (auch durch Fracking) hätte einen geringeren CO_2-Fußabdruck als LNG. Laut UBA (2021: 48) ist die CO_2e-Emission in der Vorkette von LNG um den Faktor 2 (58 g/kWh

CO_2e aus Qatar) bis 3 (78 g/kWh CO_2e aus den USA) höher als der deutsche Erdgasverbrauchsmix (25 g/kWh, Stand 2018).

Mit der seit dem Russland-Ukraine-Konflikt angestiegenen Kohleverstromung in Deutschland stieg der CO_2-Fußabdruck des deutschen Stroms weiter (Abbildung 14). Zudem stieg der Steinkohleimport nach Deutschland insbesondere aus Kolumbien, wo der Abbau mit bekannten Umweltschäden einhergeht (Lambert 2015). Allein die CO_2e Vorkettenemission inklusive Hilfsenergie des deutschen Steinkohleimports ist mit 35 g/kWh (UBA 2021 S. 62) geringer als der LNG-Import (Stand 2018), ebenso wie die Vorkettenemission heimischer Braunkohle (10 g/kWh UBA 2019 S. 43). Die in Deutschland fortgeführte Kohleverstromung hätte zudem mit CCS einen geringen CO_2-Fussabdruck. Ein Umstieg der deutschen Kohleverstromung auf pipelinegebundenes Erdgas ginge nach Ladage et al. (2021) mit 30 bis 55% weniger CO_2e-Klimagasen einher.

Die anthropogen verursachte Klimaerwärmung wird neben technologischen Lösungen auch die Adaption durch naturbasierte Lösungen (nature-based solutions NbS) wie Bewaldung, Erhalt von Torfmooren und Mangroven, Anpassungen der landwirtschaftlichen Nutzung und Viehhaltung u.a. (IPPC 2022 S. 948ff) erfordern.

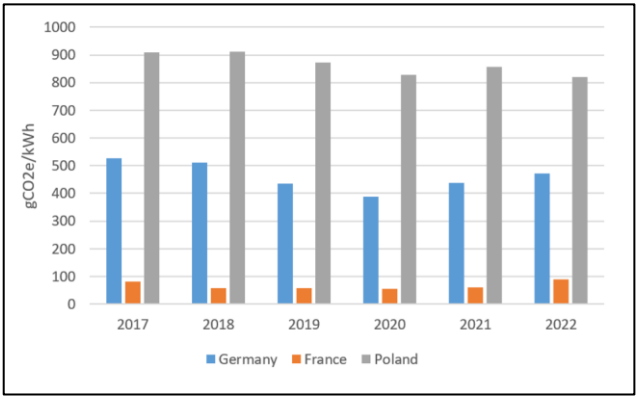


Abb. 14: CO_2-Emissionen pro erzeugter kWh-Strom für ausgewählte Länder der EU-27 zeigen den Unterschied der kohlebasierten Verstromung Deutschlands und Polens im Gegensatz zur kernenergie-basierten Verstromung Frankreichs auf (ElectricityMap.org 2023).

China als weltweit größter CO_2-Emittent (Abbildung 15) baut derzeit mehr Kohlekraftwerke als der Rest der Welt zusammen und ist gleichzeitig mit 546 Mrd. USD der größte Investor in Windkraft, PV, Batterien und eMobilität vor Europa (180 Mrd. USD) und den USA (141 Mrd. USD) (Stand 2022, Schonardt 2023). Nicht nur bei Entwicklung und Fertigung von e-Autos, Batterien und PV, sondern auch beim Export von Windkraftanlagen nimmt China eine global führende Rolle ein (2021 ein Exportwert der WKAs von 7,2 Mrd. USD, David 2022). Auch westliche OEMs (Original Equipment Manufacturer) wie GE (USA), Vestas (DK) und Siemens Gamesa (ES) fertigen Windkraftanlagen aufgrund der geringen Kosten und guten Lieferketten für den globalen Markt in China (David 2022). Entsprechend seien die Erwartungen der vergangenen und jetzigen Bundesregierungen auf einen signifikanten wirtschaftlichen Beitrag durch die heimische Produktion von Windkraftanlagen in Deutschland bislang nicht eingetreten (Vetter & Wetzel 2023).

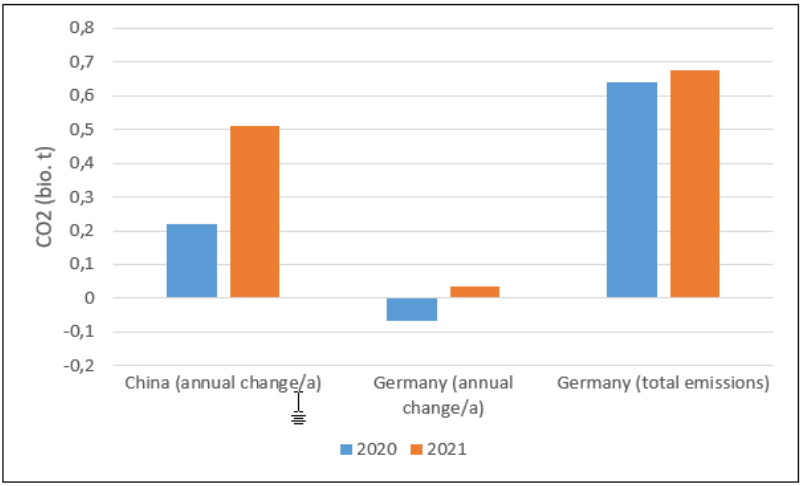


Abb. 15: Änderung der CO_2-Emissionen in China und Deutschland, im Vergleich zum gesamten deutschen CO_2-Ausstoß. Der aktuelle, jährliche Zuwachs an Emissionen in China (2019/2020 220 Mio. t, 2020/2021 510 Mio. t) entspricht nahezu den gesamten Emissionen Deutschlands (675 Mio. t) (Ritchie & Rosner 2020).

7.3 Änderung der Lieferketten

Durch die Umstrukturierung der globalen Energieversorgung mit einer weiteren Pipelineanbindung Chinas und ggfs. anderer asiatischer Länder wie Indien an die russischen Erdgasfelder Sibiriens kann Asien den Bezug von günstigem pipelinegebundenem Erdgas aus Russland ausbauen und eine preiswerte Energieversorgung sichern. Das derzeit wirtschaftlich stagnierende Europa, insbesondere Deutschland, muss auf teurere, alternative Energiequellen zurückgreifen.

Der globale Erdgas- (und LNG) Markt wird die Investitionen für die Aufsuchung und Gewinnung neuer Erdgasfelder begrenzen, da sich der globale Markt umschichtet, aber der Bedarf nicht signifikant steigt. Nach einer Flaute steigen seit 2021 die globalen Investitionen in Kohle (105 Mrd. USD/a 2021, 10% yoy Steigerung) sowie Upstream Erdgas & Erdöl (380 Mrd. USD/a 2021), liegen aber c. 20% unter den Investitionen vor COVID-19 (IEA 2022). Gleichzeitig erfahren die erneuerbaren Energien große Investitionen (China 308 Mrd. USD, EU 260 Mrd. USD, USA 215 Mrd. USD in 2021) (IEA 2022).

Die Rohstoffversorgung für die Energie- und Mobilitätswende wird durch den Russland-Ukraine-Konflikt beeinträchtigt. Russland ist Weltmarktführer bei der Produktion von batterietauglichem class-1 Nickel und ist unter den fünf größten Bergwerksförderländern für Graphit und Kobalt, das in Batterien verwendet wird. Ebenso ist Russland bei den Platingruppenmetallen (PGE) Palladium Weltmarktführer und bei Platin zweitgrößtes Bergwerksförderland, die zwar als Katalysatoren an Bedeutung verlieren, aber durch die Förderung des PGE Metalls Iridium für Protonaustauschmembran-Elektrolyseure (PEMEL) ersetzt werden könnten (USGS 2023).

7.4 Umbau des Energiesystems

Der Bau großer saisonaler Energiespeicher im Untergrund für Wasserstoff ist in Deutschland geologisch möglich und andernorts wie bspw. in Großbritannien bereits seit 1972 bis heute im Betrieb (Engie 2021). Die Umrüstung vorhandener Salzkavernen in Norddeutschland und der mehrjährige Bau neuer Salzkavernen würde den notwendigen Speicherraum verfügbar machen.

Ebenso ist das große Speichervolumen für die dauerhafte CO_2-Speicherung (CCS) lange bekannt, der Betrieb von CCS wird andernorts wie in der norwegischen Nordsee seit Jahrzehnten durchgeführt. CCS kann unvermeidliche Emissionen, wie bei der Zementherstellung, und temporäre Abgase von Gas- und Kohlekraftwerken oder Müllverbrennung dauerhaft im Untergrund speichern.

Ein effizientes, wasserstoffbasiertes Energiesystem benötigt hochskalierte Elektrolyseure-Technologien für die notwendigen Volumina. An den teilweisen Rohstoffengpässen für den Bau der Elektrolyseuranlagen wie Iridium und den potentiell kritischen Rohstoffen für den Bau von Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen herrscht kein geologischer Mangel, allerdings müssten für die Rohstoffverfügbarkeit Kapazitäten kurzfristig ausgebaut werden. Auch kostengünstige Standorte wie Oman und Saudi-Arabien forcieren den Aufbau einer Wasserstoffindustrie (Ansari 2022) und sollten auch im Blickfeld Deutschlands liegen, um alternative Konzepte eines fairen Handels des Energieträgers Wasserstoff zu entwickeln.

Ob bei der geplanten Transformation in Deutschland auch Technologien und Wissen der energieintensiven Industrien für Grundstoffe, Metalle, sowie assoziierte Recyclingkapazitäten erhalten werden, bleibt abzuwarten. Die chemische Industrie verzeichnete 2022 einen Rückgang der Emissionen um 19%, die Metallindustrie um 8%; dies ging mit den hohen Kosten in Deutschland für Erdgas als Energiequelle, Methan und den Rohstoff Wasserstoff sowie mit dem Konjunktureinbruch und geringerer Produktion einher (UBA 2023 S. 18).

Grundstoff- und Metallindustrie sind für die Entwicklung und technologische Innovation, für geostrategische Produkte und für die Gewinnung kritischer Rohstoffe, sowie für den Ausbau einer Kreislaufwirtschaft relevant. Reuter et al. (2019) verweisen auf die oft fehlende produkt(mineral)zentrierte quantitative Analyse von Kreislaufwirtschaft mit Massen-, Energie- und Exergie-Bilanz. Die Autoren zeigen die für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft notwendigen thermodynamischen und metallurgischen Daten und Prozesse auf, um die in der gesamten Wertschöpfungskette (Energie, Wasser, Metallurgie, Produktion etc.) entstehenden Verluste und Abfälle zu ermitteln und eine datengestützte Entwicklung der Kreislaufwirtschaft zu forcieren.

7.5 Benennung von Rohstoffen

Primäre Rohstoffe werden dem Naturraum entnommen und werden als (i) mineralische Rohstoffe in die Industrieminerale, Metalle und Steine & Erden und die (ii) Energierohstoffe (Erdgas, Erdöl, Kernbrennstoffe, Geothermie und Wasserstoff) differenziert (s. z.B. BGR 2023). Alle Energierohstoffe sind Energieträger und gleichzeitig Rohstoff, manche enthalten auch primär Energie und sind Energiequelle: Erdgas als Energiequelle bspw. und als Wasserstoffquelle, Erdöl als Energiequelle und Rohstoff für die pharmazeutische und chemische Industrie, Kernbrennstoffe als Energiequelle und deren Radionuklide als Rohstoff für die Medizin und Industrie, Geothermie als Energieträger und Rohstoff als im Thermalwasser gelöstes Lithium (Steiger et al. 2022). Sollten sich die natürlichen Vorkommen von Wasserstoff, die von anderen Ländern untersucht werden (z.B. Government Australia 2023) als ökonomisch gewinnbare Reserven erweisen, wäre auch der Energieträger Wasserstoff eine Energiequelle.

Ob die bisher übliche Rohstoffklassifikation noch ausreichend deren inzwischen heterogene Verwendungszwecke korrekt darstellt, sollte diskutiert werden. So werden Rohstoffe häufig nach Zustand (Steine und Erden: Sand, Kies, Gips, Anhydrit), andere nach chemischen Elementen (Metalle), nach Verwendungszweck (Industrieminerale: Ton, Feldspat, Kaolin, Stein-, Kali-, Magnesiumsalz) und nach einer physikalischen Größe (Energierohstoffe) klassifiziert.

Fluide mineralische Rohstoffe (Erdöl, Erdgas, Sole, Geothermalwasser, Edelgase) und feste mineralische Rohstoffe (Kohle, Industrieminerale, Metalle, Steine und Erden) würden den Aggregatzustand bei der Rohstoffgewinnung benennen. Die beiden fluiden und festen mineralischen Rohstoffklassen gingen mit den Gewinnungstechnologien einher (Fluidbergbau, Festbergbau). Der Verwendungszweck von Rohstoffen als Energiequelle (Erdgas, Erdöl, Kohle, sowie Uran und Thorium für die Kernenergie) oder als Rohstoff im Agrarsektor (Düngemittel Kalium, Phosphat u.a.) oder Industriesektor, bspw. im Baugewerbe (Sand, Kies, gebrochene Natursteine, Karbonatgesteine, Gips u.a.) in der Metallindustrie (Metallerze, Kalkstein zu Schlackenbildung u.a.), in der Keramikindustrie (Kaolin, Feldspat u.a.), der chemischen und pharmazeutischen Industrie (Erdgas, Erdöl u.a.), der Farbenindustrie (Erdöl,

Titanerze, Eisenerze u.a.), der Papierindustrie (Kaolin, Kalkstein, Titanerze, Schwefel, Polymere aus Erdöl u.a.), der Glasindustrie (Sand, Kalk- und Karbonatgestein u.a.), der Halbleiterindustrie (Sand, Kohle, Erdöl, Kupfer, Gold, Edelgase u.a.) würde das häufig unbekannte Einsatzspektrum verdeutlichen.

7.6 Energie-Rücklaufzeit (Erntefaktor)

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) von Energieanlagen wird als Energie-Rücklaufzeit / Erntefaktor (energy return on energy invested ERoEI, EROI) charakterisiert. Der EROI wird als Quotient der durch die Energieanlage bereitgestellten Energie und der dazu notwendigen Energie (Bau, Betrieb, Abbau des Kraftwerks sowie Brennstoffbereitstellung (Gewinnung, Transport, Aufbereitung)) dargestellt. Der EROI ist ein dynamischer Parameter und ist von vielen Faktoren wie der verwendeten Technologie, den Lieferketten, Wechselkursen u.v.a.m. abhängig (Tabelle 4). Der Erntefaktor von PV-Anlagen wird in gemäßigten Breiten mit 7-8 beschrieben (Raugei et al. 2017, s.a. Bhandari et al. 2015). Raugei et al. (2017) bezogen sich auf Ferroni & Hopkins (2016, 2017), die einen negativen Erntefaktor von 0,82 ableiteten. Bei einem negativen Erntefaktor erzeugt die Anlage weniger Energie als für Bau, Betrieb und Abbau notwendig sind. Wenige Studien vergleichen die unterschiedlichen Energieanlagen. Weißbach et al. (2013) zeigte, dass unter den gegebenen Annahmen und zum damaligen Zeitpunkt alle Energieanlagen mehr Energie erzeugen als sie an Energie verbrauchen. Mit einem Faktor zwischen BIP/Endenergieverbrauch als Wertschöpfung pro Energie und dem Endenergiepreis, dem sog. Stromwert, ermitteln die Autoren einen Grenzwert von 7, nach dem PV-, Windkraft- und Biomasseanlagen in Deutschland noch nicht wirtschaftlich betrieben werden konnten (Weißbach et al. 2013). Die technologische Entwicklung führt inzwischen auch in Deutschland zu höheren Erntefaktoren, die bspw. von Fraunhofer ISE (2023 S. 53) für PV mit 11-15 angegeben werden.

Anlage	EROI	EPBT	Anlage	EROI	EPBT
Natural gas	28	9 d	PV multi-Si	4 (2,3)	6 / 16 a
Biogas	3,5	12 d	PV multi-Si (1)	1,6 (2,1)	1,1 a
Laufwasser	50 (35)	2 (3) a			
Kernkraft	75 - 105	2 Monate	Braunkohle	31	2 Monate
Windkraft	16 (4)	1 / 5 a	Steinkohle	29	2 Monate

Tab. 4: Erntefaktor (EROI energy return on energy invested) und energetische Amortisationszeit (EPBT energy payback time) von Energieanlagen in Deutschland. Für Wind und PV wurde der Erntefaktor in Klammern als (buffered) ergänzt, indem eine Energiespeicherung im Pumpspeicherkraftwerk berücksichtigt wurde (PV mit Poly-Si Paneelen, nach Weißbach et al. 2013). Die technologische Entwicklung wird bspw. in der Photovoltaik (PV) durch neuere Daten aus Fraunhofer ISE 2023 (1) dargestellt.

7.7 Krisen und Katastrophen

Die Eskalation von Schäden wird als Normalfall, Notfall, Krise sowie Katastrophe beschrieben (BBK 2023) und medial nicht immer differenziert. Während im Normalfall eine Störung betriebsintern behoben wird, wird der Notfall beschrieben als „Situation mit dem Potenzial für oder mit bereits eingetretenen Schäden an Schutzgütern, die neben Selbsthilfemaßnahmen des Einzelnen staatlich organisierte Hilfeleistung erforderlich machen kann“ (BBK 2023). Die Krise ist eine „Vom Normalzustand abweichende Situation mit dem Potential für oder mit bereits eingetretenen Schäden an Schutzgütern, die mit der normalen Ablauf- und Aufbauorganisation nicht mehr bewältigt werden kann, so dass eine besondere Aufbauorganisation erforderlich ist“ (BBK 2023). Die Katastrophe ist „Ein Geschehen, bei dem Leben oder Gesundheit einer Vielzahl von Menschen oder die natürlichen Lebensgrundlagen oder bedeutende Sachwerte in so ungewöhnlichem Ausmaß gefährdet oder geschädigt werden, dass die Gefahr nur abgewehrt oder die Störung nur unterbunden und beseitigt werden kann, wenn die im Katastrophenschutz mitwirkenden Behörden, Organisationen und Einrichtungen unter einheitlicher Führung und Leitung durch die Katastrophenschutzbehörde zur Gefahrenabwehr tätig werden“ (BBK

2023). Der Einfluss des katastrophalen Russland-Ukraine-Konflikts auf die deutsche Energieversorgung kann sicherlich als Notfall und mit dem Aufbau des „Krisenteams Gas“ unter Vorsitz des BMWK (Bundesnetzagentur 2022b) als temporäre Krise bezeichnet werden.

8 Schlussfolgerung

Rohstoffe und Energie gehen miteinander einher. Ohne Energie keine energieintensive Rohstoffgewinnung, keine energieintensive Verhüttung und kein energieintensives Recycling. Ein Abwandern der energieintensiven Metallindustrie und des assoziierten Wissens würde mit einem Verlust heimischer Recyclingkompetenz und Kreislaufwirtschaft, sowie geostrategischer und sicherheitsrelevanter Aspekte einhergehen und sollte eruiert werden.

Wenn die EU und Deutschland beim zunehmenden Wettbewerb um Rohstoffe wettbewerbsfähig bleiben wollen, sollte der vernachlässigte Montansektor der angewandten Geologie, des Bergbaus und der Metallurgie durch Aufbau der relevanten Industrie und Forschung in der EU und Deutschland wieder entwickelt werden. Die EU-Ziele des CRMA sind wichtig, aber hinsichtlich Breite und Zeitrahmen 2030 unrealistisch. Der diskutierte Rohstofffonds der Bundesregierung wäre eine Maßnahme, wenn damit auch geeignete Randbedingungen einhergehen.

Ohne eine breite Kompetenz und flankierende strategische Rahmenbedingungen wie öffentliches Verständnis, Schulbildung und öffentliche Bildung zu naturwissenschaftlich-technischen Kreisläufen und deren Grenzen können Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft im Hinblick auf die internationale Konkurrenz in Europa und Deutschland kaum gesichert werden.

Bisher wird durch den Import von Metallen, Kohle und nun verflüssigtem Erdgas LNG der CO_2-Fußabdruck Deutschlands ins Ausland exportiert und heimische Ressourcen geschont. Der Export von Vorketten und assoziierten CO_2-Emissionen ins Ausland nützt der deutschen Klimabilanz, aber nicht dem globalen Klima und der Umwelt und sollte evaluiert werden.

Nur dann, wenn weiterhin neue, innovativere, klima- und umweltschonendere Technologien entwickelt und eingesetzt werden, und bezahlbarer Umweltschutz auf höchstem Niveau global umgesetzt wird, kann sich eine nachhaltigere Entwicklung bei weiterhin global steigender

Weltbevölkerung und weiterhin steigendem Wohlstand durchsetzen. Solche technologischen Entwicklungen können Entwicklungsländer und Schwellenländer kaum leisten.

Der geologische Untergrund und das geologische (Roh)Stoffverständnis sind für die erfolgreiche Umsetzung von Energie- und Mobilitätswende essentiell. Dies beinhaltet die für eine erfolgreiche Energie- und Mobilitätswende notwendige Aufsuchung, nachhaltigere Gewinnung und Kreislaufführung der in kurzer Zeit benötigten, großen Rohstoffvolumina für Windkraft-, PV-Anlagen und Batterien bei gleichzeitiger Reduktion des ökologischen Fußabdrucks. Dazu zählt auch der wirtschaftliche Ausbau grundlastfähiger Energiequellen wie Geothermie für die Wärmewende und die Gewinnung von Erdgas als Energiequelle und Backup für die volatilen Energiewandler Windkraft und PV sowie als Rohstoff. Ebenso ist die Lokalisierung geeigneter Geologie für den Bau und Betrieb großer Untergrundspeicher als saisonale Wasserstoffspeicher und permanente CO_2-Speicher notwendig und in Deutschland möglich.

Technologische und naturbasierte Lösungen können den Einfluss der Technosphäre auf Klima und Umwelt reduzieren. Nur wenn die alternativen Lösungen am globalen Markt erfolgreich sind und der steigenden Weltbevölkerung bei steigendem Wohlstand nutzen, können sie zu einer global nachhaltigeren Entwicklung beitragen.

Bibliographie

AGEB (2022a): Energieflußbild der Bundesrepublik Deutschland 2021. AGEB_Energieflussbild-2021_PJ_lang_DE_20230322 (ag-energiebilanzen.de).

AGEB (2022b): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_21p2_V3_20221222.pdf.

Ansari, Dawud (2022): The Hydrogen Ambitions of the Gulf States. SWP Comments, NO.44 JULY 2022, https://www.swp-berlin.org/publications/products/comments/2022C44_HydrogenAmbitiones_GulfStates_WEB.pdf.

Barkhausen, Barbara (2023): China lockert Handelsbarrieren gegen Australien weiter. 4.8.2023, https://www.nzz.ch/international/china-lockert-handelsbarrieren-gegen-australien-weiter-ld.1750168?reduced=true.

BASE (2022): Suche nach einem Endlager – Aktueller Stand und wie geht es weiter? https://www. endlagersuche-infoplattform.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/Endlagersuche/DE/2022/1220-zeitplan-zwischenstand.html#:~:text=Nach%20Angaben%20der%20Bundesgesellschaft%20f%C3%BCr%20Endlagerung%20%28BGE% 29%20mbH,2031%2C%20wie%20ihn%20das%20entsprechende%20Gesetz%20bislang%20anstrebt.

BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2023): Glossar. https://www. bbk.bund.de/DE/Infothek/Glossar/_functions/glossar.html?nn=19742&cms_lv2=19756.

BGR (2011): Commodity Top News. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/ Gemeinsames/ Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/36_kritische-versorgungslage.pdf; jsessionid=C1386DEEB912EB9E4DBC5A4ADA94AF60.internet952?__blob=publicationFile&v=6.

BGR (2021): Seltene Erden Informationen zur Nachhaltigkeit. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/seltene_erden.pdf;jsessionid=C1386DEEB912EB9E4DBC5A4ADA94AF60.internet952?__blob=publicationFile&v=4

BGR (2023): Energieträger. Zugriff 6.8.2023, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/energie_ node.html;jsessionid=10E560404DAB7E8A1EA487628B1F91EA.internet981.

Bhandari, Khagendra P. / Collier, Jennifer M. / Ellingson, Randy J. / Apul, Defne S. (2015): Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 133-141, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.057.

BP (2023a): Energy outlook – summary tables https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/energy-outlook-downloads.html.

BP (2023b): Energy outlook – electricity. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/electricity.html.

Bundesnetzagentur (2023): Kraftwerksliste. Stand 19.7.2023 https://www.bundesnetzagentur.de/DE/ Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/ Kraftwerksliste/start.html.

Bundesregierung (2022): Generationenvertrag für das Klima. 7.11.2022, https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672

Bundesnetzagentur (2022b): Hintergrundinformationen. https://www.bundesnetzagentur. de/DE/ Gasversorgung/Hintergrund/ start.html.

Cohen, Patricia (2023): Why One Country Is Struggling to Break Away from Russian Gas. The New York Times, 31.7.2023, https://www.nytimes.com/2023/07/31/business/energy-environment/austria-natural-gas-russia.html.

David, Andrew (2022): Chinese Wind Turbine Export Growth Continued in 2021. U.S. International Trade Commission, Executive Briefings on Trade, March 2022, https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_chinese_wind_turbine_export_growth_continued_in_2021.pdf.

DERA (2014): Rohstoff Seltene Erden https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/m-seltene-erden.pdf;jsessionid=C1386DEEB912EB9E4DBC5A4ADA94AF60.internet952?__blob= publicationFile&v=5.

DERA (2023): DERA Rohstoffinformationen 56 DERA-Rohstoffliste 2023 Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/ Produkte/Downloads/DERA_ Rohstoffinformationen/rohstoff-informationen-56.pdf;jsessionid= 88FF9089E972C0453E43243DF 64B2AB4.internet952?__blob=publicationFile&v=3.

Destatis (2023a): Einfuhr von Steinkohle für die Jahre 2018 bis 2022. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/einfuhr-steinkohle-zeitreihe.html.

Destatis (2023b): Einfuhr von Steinkohle für das Jahr 2023 https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/ Energie/Verwendung/Tabellen/einfuhr-steinkohle-jaehrlich.html.

EIA (2023): Natural gas explained https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/imports-and-exports.php.

ElectricityMap.org (2023): Deutschland https://app.electricitymaps.com/zone/DE.

El-Showk, Sedeer (2022): Final resting pace. Science, Vol 375, Issue 6583, https://www.science.org/content/article/finland-built-tomb-store-nuclear-waste-can-it-survive-100000-years.

Enerdata (2023a): Coal and lignite domestic consumption https://yearbook.enerdata.net/coal-lignite/coal-world-consumption-data.html.

Enerdata (2023b): India will raise its nuclear installed capacity over 22 GW by 2031. https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/india-will-raise-its-nuclear-installed-capacity-over-22-gw-2031.html.

Engie (2021): H2 in the underground: are salt caverns the future of hydrogen storage. News 27.7.2021, https://innovation.engie.com/en/news/news/did-you-know-/hydrogen-underground-storage-salt-caverns/25906#:~:text=The%20first%20hydrogen%20storage%20cavern%2C%20which%20was%20built,which%20could%20be%20quickly%20converted%20to%20hydrogen%20storage.

ESA (2020): Euratom supply agency annual report 2019 https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2021-06/last.pdf.

ESA (2021): Euratom supply agency annual report 2020 https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2021-10/MJAA21001ENN_002.pdf.

ESA (2022): Euratom supply agency annual report 2021. https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2022-12/Euratom%20Supply%20Agency%20-%20Annual%20report%202021%20-%20Corrected%20edition.pdf.

ESA (2023): Market Observatory https://euratom-supply.ec.europa.eu/activities/market-observatory_en.

EU (2022): DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2022/1214 DER KOMMISSION vom 9. März 2022 zur Änderung der Delegierten Verordnung (EU) 2021/2139 in Bezug auf Wirtschaftstätigkeiten in bestimmten Energiesektoren und der Delegierten Verordnung (EU) 2021/2178 in Bezug auf besondere Offenlegungspflichten für diese Wirtschaftstätigkeiten https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1214.

EU (2023a): ANHÄNGE des VORSCHLAGS 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.

EU (2023b): Factsheet Critical Raw Materials Act. https://ec.europa.eu/commission/ presscorner/detail/en/fs_23_1663.

EU (2023c): 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.

Eurostat (2022): Nuclear energy statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Nuclear_energy_statistics#Uranium_supply_security.

Eurostat (2023): Supply, transformation and consumption of solid fossil fuelshttps://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_cb_sff/default/table?lang=en

Ferroni, Ferruccio / Guekos, Alexandros / Hopkirk Robert J. (2016): Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. Energy Policy, 94, 336-344, http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.034.

Ferroni, Ferruccio / Hopkirk Robert J. (2017): Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for in regions of moderate insolation: A comprehensive response. Energy Policy, 102, 377-384, http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.042.

Fraunhofer ISE (2023): Recent Facts about Photovoltaic in Germany. Download from https://www.pv-fakten.de/ , version of 17.05.2023.

Global Energy Monitor (2023a): Boom and Bust Coal 2023: Tracking the Global Coal Plant Pipeline https://globalenergymonitor.org/report/boom-and-bust-coal-2023/.

Global Energy Monitor (2023b): Coal-fired power capacity by country. https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/.

Government of Australia (2023): Natural hydrogen. Energy & Mining, Zugriff 6.8.2023.b, Natural hydrogen | Energy & Mining (energymining.sa.gov.au.

Graichen, Patrick (2022): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage Drs.-Nr. 20/633 Fraktion der CDU/CSU zum Thema „Gaskraftwerke in Deutschland – Status quo und geplanter Zubau". https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Parlamentarische-Anfragen/2022/03/20-633.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Gregoir Liesbet / van Acker, Karel (2022): Metals for clean energy. 116 S., https://eurometaux.eu/metals-clean-energy/?msclkid=f9b3f7facf0311ecafd498b57bceb700.

Gupta, Kuhika / Ripberger, Joseph T. / Fox, Andrew S. / Jenkins-Smith, Hank C. / Silva, Carol L. (2021): The future of nuclear energy in India: Evidence from a nationwide survey, Energy Policy, Volume 156, 112388, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112388.

Handelsblatt (2023): Russland und China investieren in Lithium-Förderung 30.6.2023, https://www.handelsblatt.com/politik/international/e-mobilitaet-in-bolivien-russland-und-china-investieren-in-lithium-foerderung/29231996.html.

Herrmann, C. (2023): "Power of Siberia 2" von GazpromXi straft Putins Mega-Pipeline mit Schweigen. NTV 2.4.2023, Zugriff 6.8.2023, https://www.n-tv.de/wirtschaft/Power-of-Siberia-2-Xi-straft-Putins-Mega-Pipeline-mit-Schweigen-article24025861.html.

Heunemann, Falk (2022): Das Gasembargo ist derzeit vom Tisch. FAZ vom 4.6.2022, https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/wirtschaft/chemiepraesident-kullmann-das-gasembargo-ist-vom-tisch-18080495.html.

Hilgers, Christoph / Busch, Benjamin (2022): Energieträger und Rohstoff Erdgas: Verfügbarkeit, Verwendung und Geopolitik Voraussichtliche Engpässe und Möglichkeiten. KIT Scientific Working Papers, Vol. 198, 100 S., https://publikationen.bibliothek.kit. edu/1000150490.

Hilgers, Christoph / Kolb, Jochen / Becker, Ivy (2021): Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient? Bergbau – Verhüttung – Recycling. Think Tank für Industrielle Ressourcenstrategien, 72 S., Karlsruhe DOI 10.5445/IR/1000124406.

Hilgers, Christoph / Becker, Ivy (2020): Local availability of raw materials and increasing global demand – aspects of resilient resource strategies. Lokale Verfügbarkeit von Rohstoffen bei steigender globaler Nachfrage – Aspekte zu resilienten Ressourcenstrategien. World of mining, surface & underground, 72, 5, 254-263.

IAEA (2019): Thorium Resources as Co- and By-products of Rare Earth Deposits. IAEA-TECDOC-1892, 62 S., https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1892web.pdf.

IAEA (2021): Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. 137 S., https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-1-41_web.pdf.

IEA (2020): Electricity market report 2020 global overview: prices. https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-december-2020/2020-global-overview-prices.

IEA (2022): CO_2 emissions in 2022. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022.

IEA (2022): World energy investments 225 S., https://iea.blob.core.windows.net/assets/b0beda65-8a1d-46ae-87a2-f95947ec2714/WorldEnergyInvestment2022.pdf.

IEA (2023): The coal trade's shift to the Pacific continues https://www.iea.org/reports/coal-2019.

IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

IWF (2023a): International Monetary Fund, Global price of Natural gas, EU [PNGASEUUSDM], retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis; https://fred.stlouisfed.org/series/PNGASEUUSDM, August 3, 2023.

IWF (2023b): International Monetary Fund, Global price of Natural Gas, US Henry Hub Gas [PNGASUSUSDM], retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis; https://fred.stlouisfed.org/series/PNGASUSUSDM, August 3, 2023.

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.

Ladage, Stefan / Blumenberg, Martin / Franke, Dieter / Bahr, Andreas / Lutz, Rüdiger / Schmidt, Sandro (2021): On the climate benefit of a coal-to-gas shift in Germany's electric power sector. Nature Communication, Sci Rep 11, 11453 https://doi.org/10.1038/s41598-021-90839-7.

Lambert, Tobias (2015): Bergbauboom in Lateinamerika - Factsheet Kolumbien. https://ak-rohstoffe.de/wp-content/uploads/2021/05/FDCL_FACT_Kolumbien21122015web.pdf.

Mallapaty, Smriti (2021): China prepares to test Thorium-nuclear reactor. Nature, Vol 597, September, 312 https://www.nature.com/articles/d41586-021-02459-w.

Maslin, Mark / van Heerde, Livia / Dey, Simon (2022): Sulfur: A potential resource crisis that could stifle green technology and threaten food security as the world decarbonises. The Geographical Journal, 188, 498–505. DOI: 10.1111/geoj.12475.

Munzinger, Paul (2023): Nigers Putsch und Russlands Chance. Die Süddeutsche, 28.7.2023, https://www.sueddeutsche.de/politik/niger-putsch-russland-afrika-1.6074559.

Nagra (2022): The site for the deep geological repository. 63 S., https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/09/The-site-for-the-deep-geological-repository-Nagras-proposal.pdf.

NOAA (2022): Monthly average Mauna Loa. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/.

Nugyen, Mai (2023): China's rare earths dominance in focus after it limits germanium and gallium exports. Reuters 5.7.2023, https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-rare-earths-dominance-focus-after-mineral-export-curbs-2023-07-05/.

Peng, Zhongzhou (2023): What's Behind China's Resumed Imports of Australian Coal? The Diplomat, 14.1.2023, https://thediplomat.com/2023/01/whats-behind-chinas-resumed-imports-of-australian-coal/.

Ramos, Daniel (2019): Bolivia picks Chinese partner for $2.3 billion lithium projects. Reuters vom 6.2.2019, https://www.reuters.com/article/us-bolivia-lithium-china-idUSKCN1PV2F7.

Raugei, Marco et al. (2016): Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in the regions of moderate insolation: A comprehensive response. Energy Policy 102, 377-284, http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.034

Reuter, Markus A. / van Schaik, Antoinette / Gutzmer, Jens / Bartie, Neill / Abadías-Lamas, Alejandro (2020): Challenges of the circular economy: A material, metallurgical, and product desin perspective. Annual Review of Materials Research, 49, 253-273, https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010057

Reuters 2023 Kazakhstan, Russia map out gas pipeline to China. Reuters 16.5.2023, Zugriff 6.8.203, https://www.reuters.com/markets/commodities/kazakhstan-russia-map-out-gas-pipeline-china-2023-05-16/

Ritchie, Hannah / Roser, Max / Rosado, Pablo (2020): CO_2 and Greenhouse Gas Emissions. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions.

Ritchie, Hannah / Roser, Max (2020): CO_2 emissions dataset: Our sources and methods. Published online at OurWorldInData.org, retrieved from, Zugriff 6.8.2023, https://ourworldindata.org/co2-dataset-sources.

Ritchie, Hannah / Roser, Max / Rosado, Pablo (2020): CO_2 and greenhouse gas emissions. Published online at OurWorldInData.org, retrieved from https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions.

Russel, Clyde (2023): China's easing of Australian coal ban is symbolic, not market-shifting Column: China's easing of Australian coal ban is symbolic, not market-shifting. Energyworld.com, 9.1.2023, https://energy.economictimes.indiatimes.com/news/coal/opinion-chinas-easing-of-australian-coal-ban-is-symbolic-not-market-shifting-russell/96847271?redirect=1.

Schonhardt, Sara (2023): China Invests $546 Billion in Clean Energy, Far Surpassing the U.S. Scientific American E&E News, https://www.scientificamerican.com/article/china-invests-546-billion-in-clean-energy-far-surpassing-the-u-

s/#:~:text=Nearly%20half%20of%20the%20world%27s%20 low-carbon%20spending%20took,amount%20of%20U.S.%20investments%2C%20which%20 totaled%20%24141%20billion.

Sicherheit in Kerntechnik (2023): Kerntechnische Anlagen. Zugriff 6.8.2023, https://www.nuklearesicherheit.de/kerntechnische-anlagen/.

SKB (2023): Managing Swedish nuclear waste. https://skb.com/.

Statista (2023): Average lead times for mineral resources worldwide from discovery to production between 2010 and 2019. https://www.statista.com/statistics/1297832/global-average-lead-times-for-mineral-resources-from-discovery-to-production/#:~:text=Mar%2028%2C%202022%20On%20average%2C%20it%20takes%2016.9,are%20on%20average%20are%20dedicated%20to%20construction%20planning.

Steiger, Katharina / Hilgers, Christoph / Kolb, Jochen et al. (2022): Lithium in Europa. ThinkTank für Industrielle Ressourcenstrategien, 101 S., Karlsruhe, https://publikationen.bibliothek. kit.edu/1000154047.

Süddeutsche Zeitung (2022): Bund kann Frist für Endlager-Standort nicht einhalten. Vom 10.11.2022, https://www.sueddeutsche.de/politik/deutschland-atommuell-endlager-standort-suche-1.5693401.

TAG (2023): Transportkapazitäten Entry Baumgarten. https://www.taggmbh.at/ transportkapazitaeten/endpoint/baumgarten-entry/filter/overview/from/2023-01-01/to/2023-07-31/unit/kwhd.

Tagesschau (2021): Ohne Gaskraftwerke kein Kohleausstieg? Vom 06.12.2021, https://www.tagesschau.de/wirtschaft/ deutschland-braucht-neue-gaskraftwerke-101.html.

Trading.com (2023): Magnesium. Zugriff 5.8.2023 https://tradingeconomics.com/ commodity/magnesium.

UBA (2016): CO_2 Emission Factors for Fossil Fuels. 28/2016, 48 S., https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2_emission_factors_for_fossil_fuels_correction.pdf.

UBA (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. 157 S., https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf

UBA (2021): Emissionsfaktoren der Stromerzeugung - Betrachtung der Vorkettenemissionen von Erdgas und Steinkohle. 75 S., https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/cc_61-2021_emissionsfaktoren-stromerzeugung.pdf.

UBA (2022): CO_2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. https://www.umweltbundesamt.de/ sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_28-2022_emissionsfaktoren-brennstoffe_bf.pdf.

UK Parliament (2023): Tacking the energy trilemma. Research Briefing 22.3.2023 von Mawhood B, Sutherland N, https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cdp-2023-0074/.

UNECE (2021): Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. 97 S. https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf.

USGS (2023): Mineral Commodities. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf

Vetter P, Wetzel D 2023 Keine Spur vom versprochenen Wirtschaftswunder. Die Welt vom 31.7.2023, https://www.welt.de/wirtschaft/plus246636756/Die-ganze-Welt-liefert-die-Teile-fuer-unsere-Energiewende-nur-Deutschland-nicht.html.

Weißbach, Daniel / Ruprecht, Götz / Huke, Armin / Czerski, Konrad / Gottlieb, Stephan / Hussein Ahmed (2013): Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. Energy, 52, 210-221, https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029.

World Nuclear Association (2022): Uranium in Africa. https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/uranium-in-africa.aspx.

WNA World Nuclear Association (2023a): Plans for New Reactors Worldwide. https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx#:~:text=Plans%20For%20New%20Reactors%20Worldwide%201%20Nuclear%20power,programmes%20are%20maintaining%20capacity%2C%20particularly%20in%20the%20USA.

WNA World Nuclear Association (2023b): Nuclear Power in the European Union. https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx.

WNA World Nuclear Association (2023c): Nuclear power in China. https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx.

Záboji, Niklas (2021): Ökostromförderung erreicht Rekord. FAZ 12.1.2021, https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-nachhaltigkeit/30-9-milliarden-euro-oekostromfoerderung-erreicht-rekord-17141915.html.

Zachmann, Georg / Sgaravatti, Giovanni / McWilliams, Ben (2023): European natural gas imports. Bruegel, https://www. bruegel.org /dataset/european-natural-gas-imports.

Ziady, Hanna / Xu, Xiaofei (2023): China hits back in the chip war, imposing export curbs on crucial raw materials. CNN, 3.7.2023, https://edition.cnn.com/2023/07/03/business/germanium-gallium -china-export-restrictions/index.html.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *159 (2023), 71–79*

Bedeutung von Russland, Belarus und der Ukraine für die Rohstoffversorgung Deutschlands und der EU

Jochen Kolb
(Karlsruhe)

Abstract
As an important economic factor, industry in Germany and Europe needs secure access to raw materials. Wars and pandemics lead to supply bottlenecks, and strategic and foreign trade challenges in a globalized value chain. The war in the Ukraine results in further bottlenecks in the already strained raw materials market for certain raw materials and intermediate products from the related countries Ukraine, Russia and Belarus. These are primarily iron and steel products, nickel, copper, titanium, kaolin, potassium salt, manganese, tungsten, palladium, platinum, hafnium and the noble gases. For many of these products there is no strong geographic concentration, so that the market can reorient itself. There are bottlenecks primarily for tungsten, palladium, platinum, hafnium and the noble gases. New deposits in Europe could be developed, but it takes 10 to 20 years of mine development before raw materials are extracted from it. In order to diversify the raw materials market and thus make it safer against restrictions on the global market it is suggested that investment should be increased in domestic exploration and the development of the domestic mining and processing industry as well as in research and development and that strategic storage should be set up

Resümee
Die Industrie in Deutschland und Europa benötigt als wichtiger Wirtschaftsfaktor einen sicheren Zugang zu Rohstoffen. Kriege und

Pandemien führen in einer globalisierten Wertschöpfungskette zu Versorgungsengpässen und strategischen, außenwirtschaftlichen Herausforderungen. Der Krieg in der Ukraine führt dazu, dass der schon angespannte Rohstoffmarkt mit weiteren Engpässen in Bezug auf bestimmte Rohstoffe und Zwischenprodukte aus den beteiligten Ländern Ukraine, Russland und Belarus umgehen muss. Dies sind vor allem Eisen und Stahlerzeugnisse, Nickel, Kupfer, Titan, Kaolin, Kalisalz, Mangan, Wolfram, Palladium, Platin, Hafnium und die Edelgase. Für viele dieser Produkte gibt es keine starke Länderkonzentration, so dass sich der Markt umorientieren kann. Engpässe gibt es vor allem für Wolfram, Palladium, Platin, Hafnium und die Edelgase. Neue Lagerstätten in Europa könnten erschlossen werden, allerdings dauert es bis zur Rohstoffgewinnung aus einem Bergwerk 10 bis 20 Jahre. Um den Rohstoffmarkt zu diversifizieren und damit Sicherer gegenüber Einschränkungen auf dem globalen Markt zu machen, sollte mehr in heimische Exploration und den Aufbau der heimischen Bergbau- und Aufbereitungsindustrie sowie in Forschung und Entwicklung investiert und eine strategische Lagerhaltung eingerichtet werden.

Keywords/Schlüsselwörter
Raw materials, supply bottlenecks, nickel, titanium, iron, REE, Russia, Belarus, Ukraine, domestic exploration
Rohstoffe, Versorgungsengpässe, Nickel, Titan, Eisen, Seltene Erden, Russland, Belarus, Ukraine, heimische Exploration.

1 Einleitung

Mineralische Rohstoffe sind das Fundament der Wirtschaft. Die Industrie ist weiterhin ein wichtiger Wirtschaftsfaktor in der EU (17% des Bruttoinlandproduktes, BIP) und besonders in Deutschland (23% des BIP; vgl. VCI 2021). Ein freier und gesicherter Zugang zu Metallen, Industriemineralen sowie Steine und Erden ist fundamental für die Entwicklung der deutschen und der europäischen Industrie auch in Zukunft. Während eine ausreichende Versorgung mit Steine-und-Erden – Materialien durch lokalen Bergbau gesichert ist, sind Deutschland und die EU bei Metallen und Industriemineralen in vielen Fällen vollständig vom Import abhängig. Der Green Deal sowie Energie- und

Mobilitätswende stellen zusätzliche Herausforderungen an die Bereitstellung von Rohstoffen durch die Industrie (vgl. Energy Transitions Commission 2023). Es werden nicht nur mehr Rohstoffe benötigt, sondern auch eine größere Vielfalt (vgl. Energy Transitions Commission 2023). In Deutschland wird die Rohstoffstrategie von 2020 neu überarbeitet. Die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) bereitet Daten auf und berät Politik und Industrie. Die EU reagierte mit dem Critical Raw Materials Act auf die Situation (vgl. European Critical Raw Materials Act 2023). Hier werden klare Ziele für 2030 definiert, die auf die Abkopplung extremer Importabhängigkeit von kritischen und strategischen Rohstoffen abzielt.

In den letzten Jahren haben Pandemie und restriktive Rohstoffpolitik von z.B. China zur Verschärfung der Situation am Rohstoffmarkt geführt, die in Verknappung einiger Metalle und Zwischenprodukte am Markt und in starker Preisfluktuation resultierten. Der erneute Einmarsch Russlands in die Ukraine und der resultierende andauernde Krieg haben die Situation für einige Rohstoffe und Zwischenprodukte verschärft. Dies liegt vor allem an der Zerstörung der industriellen Anlagen und der lokalen Infrastruktur sowie andererseits an Sanktionspaketen gegen Länder, Firmen oder Personen. Im Folgenden wird der Einfluss des Krieges auf die Versorgung Deutschlands und der EU mit Rohstoffen und Zwischenprodukten aus Russland, Belarus und der Ukraine untersucht.

2 Russland

Russland ist weltweit nach Australien, China und Brasilien der viertgrößte Rohstoffproduzent gemessen am Wert der geförderten Rohstoffe (vgl. DERA 2022a). Das Land ist global unter den drei größten Produzenten für Palladium, Vanadium, Antimon, Platin, Stickstoff, Tellur, Kobalt, Germanium, Gallium, Titan, Pottasche und Nickel (Abbildung 1a; vgl. USGS 2022). Russland ist nach Südafrika der wichtigste Produzent von Palladium (ca. 40%) und Platin (ca. 10%). Unabhängig davon stammen nahezu 70% des deutschen Wolfram-Importes aus Russland. Mehr als 40% der deutschen Importe von Nickel und Titan werden aus Russland bezogen. Aluminium, Kupfer, Neon, Krypton und Xenon haben ebenfalls einen signifikanten Anteil. Titan, Vanadium und Tellur sind weitere wichtige Rohstoffe, die zu größeren

Anteilen aus Russland stammen. Neben großen Lagerstätten gibt es eine weitreichende Weiterverarbeitungsindustrie. Die DERA untersucht neben den primären Rohstoffen auch den Handel mit Zwischenprodukten. Hier sind vor allem Produkte aus Titan, Eisen, Kupfer und Aluminium von großer Bedeutung für den deutschen Markt. Interessant ist, dass sich der Wert der Importe von Russland nach Deutschland zwischen März 2021 und Februar 2022 noch erhöht hat (vgl. Schmidt 2022). Während Produkte aus Eisen und Aluminium geringere Importmengen verzeichnen, sind diese für Produkte aus Titan und Kupfer sogar noch gestiegen (Schmidt 2022). Russland ist also für Deutschland, aber auch die EU, ein wichtiger Lieferant für kritische und strategische Primärrohstoffe (Abbildung 2a). Für Deutschland sind das Kupfer, Nickel, Palladium, Platin und Titan sowie entsprechende Zwischenprodukte (vgl. DERA 2022a). Die rezenten Handelszahlen zeigen die Wichtigkeit und Unverzichtbarkeit von Titan- und Kupferlieferungen aus Russland.

3 Ukraine

Die Ukraine ist mit 0,5-1,0% des Wertes der globalen Rohstoffproduktion immer noch ein wichtiger Rohstoffproduzent für den globalen Markt (vgl. DERA 2022a). Das Land ist global der drittgrößte Produzent von Rutil und Gallium, der fünftgrößte Produzent von Titan, Graphit und Brom sowie wichtiger Produzent von Mangan, Eisenerz, Kaolin, Magnesium, Ilmenit, Roheisen, Torf, Rohstahl und Bentonit (Abbildung 1b; vgl. USGS 2022). Global ist die Ukraine also ein wichtiges Rohstoffland für Titanminerale, die Großteils in Russland weiterverarbeitet werden. Die Produktion von Neon, das unverzichtbar für die Lasertechnologie in der Chipherstellung ist, machte ca. 50% des Weltmarktes aus (vgl. USGS 2022). Deutschland hat allerdings für Edelgase inklusive Neon nur einen Importanteil von 10% (Abbildung 2b; vgl. DERA 2022b). Wichtige Importe aus der Ukraine nach Deutschland umfassen vor allem Rohstoffe und Produkte aus Hafnium, Titan und Mangan, die 30-40% Anteil einnehmen (vgl. DERA 2022a). Kaolin und Mangan sind ebenfalls signifikant (vgl. DERA 2022b). Zwischen März 2021 und Februar 2022 hat Deutschland viel weniger der meisten Produkte aus der Ukraine importiert, nur Kupfer und Titan sowie Produkte aus diesen Metallen wurden noch in signifikant erhöhten Mengen importiert (vgl. Schmidt 2022).

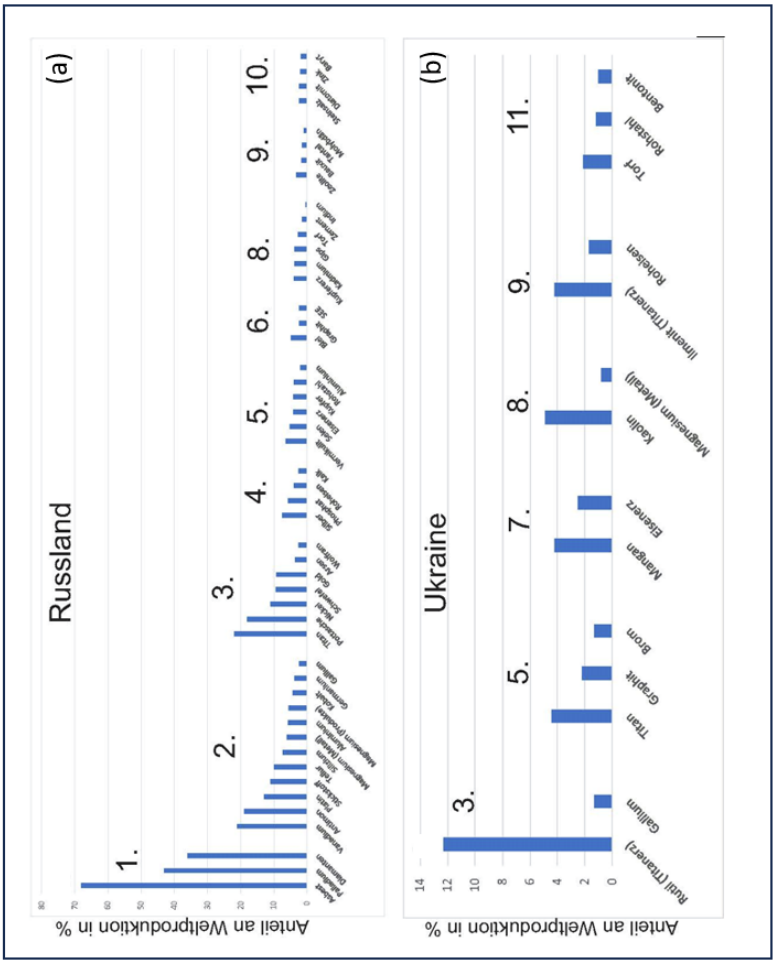
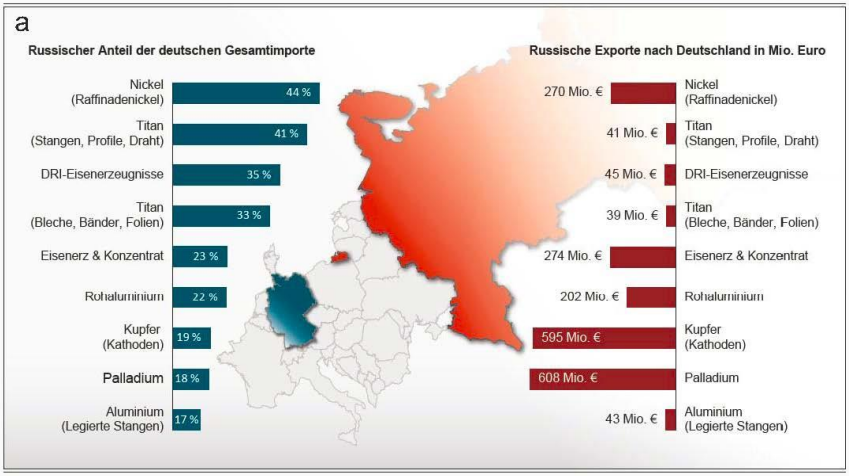
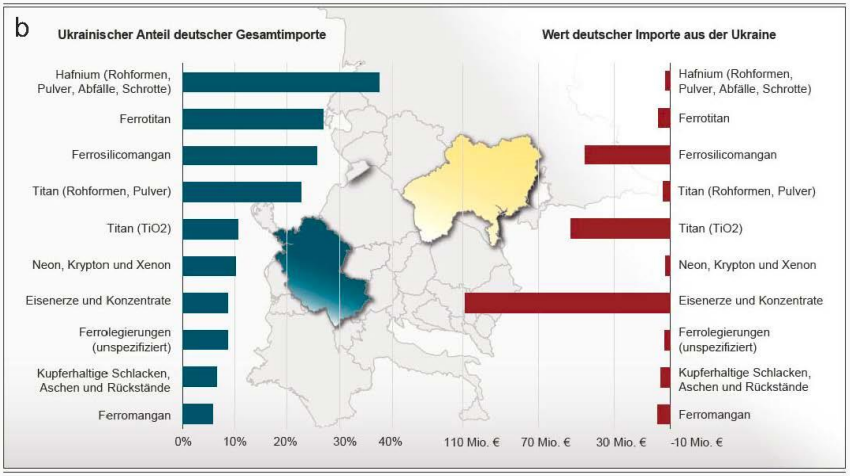


Abb. 1: Anteil der wichtigsten Rohstoffe an der Weltproduktion für (a) Russland und (b) Ukraine (Daten von USGS 2022).



Russischer Anteil der gesamten deutschen Metallimporte und deren Wert im Jahr 2020 für ausgewählte Metalle (Quelle: Destatis).
DERA Rohstofftrends Q1/22



Ukrainischer Anteil an der gesamten deutschen Metallimporte für ausgewählter Metalle und deren Wert im Jahr 2020 (Quelle: Destatis).
DERA Chart des Monats Mai 22

Abb. 2: Anteil und Wert der deutschen Gesamtimporte für ausgewählte Rohstoffe und Zwischenprodukte aus (a) Russland und (b) der Ukraine (vgl. DERA 2022a, 2022b).

4 Belarus

Belarus ist der drittgrößte Produzent von Kalisalz nach Canada und Russland (vgl. USGS 2022). Ungefähr 20% der globalen Exportmenge von Pottasche stammen allein aus der Kalilagerstätte Starobin mit einer Ressource von 50 Mio. t Erz und einer Produktion (2017) von 7.1 Mt Pottasche (K_2O Äquivalent; vgl. USGS 2022). Zusätzlich wird Stickstoff für die Düngemittelherstellung erzeugt (vgl. USGS 2022). Belarus hat eine signifikante Stahlindustrie und ist global wichtig in der Düngemittelherstellung.

5 Bedeutung für die Rohstoffversorgung

Eisen und Stahlerzeugnisse, Nickel, Kupfer, Titan, Kaolin, Kalisalz und Mangan können relativ leicht über andere Quellen ersetzt werden, da es für diese Rohstoffe keine signifikante Länderkonzentration gibt. Allerdings gab es zwischen März 2021 und Februar 2022 stark erhöhten Import von Kupfer und Titan sowie unterschiedlichen Zwischenprodukten dieser beiden Metalle sowohl aus Russland als auch aus der Ukraine. Hierbei könnte es sich um Hamsterkäufe handeln, um den Übergang zu anderen Quellen zu organisieren. Dies zeigt aber auch, dass der Bezug von Rohstoffen und Zwischenprodukten nicht immer einfach und schnell auf andere Quellen übertragen werden kann. Für Kalisalz und Kaolin gibt es bedeutsame Vorkommen in Deutschland, die genutzt werden könnten (vgl. Elsner/Kuhn/Schmitz 2017). Signifikante Engpässe gibt es also für Wolfram, Palladium, Platin, Hafnium und die Edelgase. Die Edelgase sind ein Nebenprodukt der Stahlindustrie, die in der Ukraine zerstört ist. In Leuna, Deutschland gibt es Anlagen zur Herstellung solcher Gase. Trotzdem kommt es auf dem Markt zu Engpässen, die die Verfügbarkeit der Gase auf dem Markt einschränken und zur Vervielfachung der Preise geführt haben. Für Wolfram ist China dominant, aber es gibt eine signifikante Produktion in Österreich, Spanien, Portugal und Vietnam (vgl. USGS 2022). Für Platingruppen-Metalle sind Südafrika, Simbabwe und Canada Alternativen (vgl. USGS 2022). Für diese Elemente gibt es im Gegensatz zu vielen anderen Rohstoffen eine geologische Einschränkung, da sie nur durch sehr spezielle Prozesse angereichert werden. Signifikante Lagerstätten gibt es eben vor allem in

Russland und Südafrika, neben dem genannten Simbabwe keine Länder politischer oder wirtschaftlicher Stabilität.

Es gibt also für die meisten Rohstoffe andere Bezugsquellen. Die Schwierigkeit liegt einerseits darin, die Kapazitäten der entsprechenden Produktionsstätten schnell zu erhöhen, und andererseits darin, dass häufig Halbzeug und bestimmte Zwischenprodukte benötigt werden und nicht der Primärrohstoff selbst. Ein gutes Beispiel ist Titan, für das es recht weit verbreitet Erze gibt. Für die Anwendung als weißes Pigment gibt es auch kaum Engpässe. Jedoch für die Metallurgie als sogenannter Titanschwamm gibt es eine sehr ausgeprägte Länderkonzentration auf China. Neben Russland und der Ukraine sind nur noch Japan, Kasachstan und Saudi-Arabien signifikante Produzenten (vgl. USGS 2022).

Die reduzierte Verfügbarkeit durch Krieg, Zerstörung und Sanktionen trifft auf eine angespannte Situation am Weltmarkt durch Pandemieeffekte und veränderte Nachfrage aufgrund der Energie- und Mobilitätswende sowie der Digitalisierung (vgl. Energy Transitions Commission 2023). Dies und ähnliche Situationen am globalen Rohstoffmarkt in den letzten Jahren haben dazu geführt, dass in der Politik und der Wirtschaft in Deutschland und der EU bereits einige wichtige Änderungen und Anpassungen angegangen wurden. Dies gipfelte 2023 in der Formulierung des European Critical Raw Materials Act, indem klare Ziele für strategische Rohstoffe im Jahr 2030 gesetzt werden. Zwei Beispiele zeigen, dass allein das Ziel 10% der globalen Rohstoffförderung für strategische Rohstoffe in der EU anzusiedeln, sehr ambitioniert ist. Norwegen ist der einzige Produzent von Titanerz in Europa und müsste seine Produktion bis 2030 verdoppeln. Die Platin- und Palladiumproduktion aus Finnland müsste von 2 t/a auf 40 t/a erhöht werden. Es müsste also zusätzliche Industrie aufgebaut werden, was vermutlich aber 10-20 Jahre dauern würde. Um der Entwicklung der unterschiedlichen „Wenden“ auf der Rohstoffseite folgen zu können muss also noch viel in sehr kurzer Zeit passieren. Wir benötigen

- viel mehr Investition in Exploration, um neue Rohstoffquellen zu erschließen,
- den Aufbau und die Ausweitung der heimischen Bergbau- und Aufbereitungsindustrie,
- Forschung und Entwicklung in Recycling und Rohstoffeffizienz,
- Lagerhaltung für bestimmte Rohstoffe ähnlich wie für Erdgas,
- die Ausweitung der internationalen Kooperation.

Bibliography

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022a): Rohstoff-Trends Q1/22. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Rohstoff-Trends/rohstoff-trends_01-22.pdf?__blob=publicationFile.

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022b): Chart des Monats Mai 22. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%202022_cdm_05_Metallimporte_aus_Russland.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Elsner, Harald / Kuhn, Kerstin / Schmitz, Martin (2017): Heimische mineralische Rohstoffe – unverzichtbar für Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Energy Transitions Commission (2023): Materials and Resource Requirements for the Energy Transition. www.energy-transitions.org.

European Critical Raw Materials Act (2023): https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en.

Schmidt (2022): Schule trifft Wissenschaft: Herausforderung Energiewende - auf dem Weg zu neuen Rohstoffen und Energieträgern. Herausforderungen für die Rohstoffwirtschaft. Vortrag am 27.10.2022 (Datenquelle: GTT, DESTATIS).

VCI (2021): Industrieland Deutschland, 26 S.
https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/industrieland-deutschland-daten-fakten-bedeutung-deutsche-industrie.pdf.

United States Geological Survey, USGS (2022): https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *158 (2023), 81–100*

Die gegenwärtige Lage der ukrainischen Metall- und Industriemineralproduktion und deren Folgen auf die europäische Rohstoffversorgung

Axel Müller
(MLS, Oslo, Norwegen)

Abstract
Before Russia's attack on February 24, 2022, Ukraine was one of the world-leading countries in mining metallic and non-metallic raw materials. It contains about 5 % of the world's mineral resources and ranked in the Top 10 of the World for iron, manganese, titanium, gallium, uranium, kaolin, graphite and zircon production. The abundance and diversity of minerals is due to the variety and complexity of the Ukrainian geology. These raw materials are processed in Ukraine, and the majority of the processed products is exported to the EU and other parts of the world. As a consequence of the attack, mineral production decreased in 2022 by more than 50 % for most commodities. In this study, specific reasons for the production decline are outlined on the examples of iron, manganese, titanium, kaolin and graphite and the effects on the economy of European countries, which rely on the import of these commodities, are discussed.

Zusammenfassung
Vor dem Angriff Russlands am 24. Februar 2022 war die Ukraine eines der weltweit führenden Länder im Abbau metallischer und nichtmetallischer Rohstoffe. Die Ukraine besitzt etwa 5 % der weltweiten Bodenschätze und gehörte zu den Top 10 der Welt in der Eisen-, Mangan-,

Titan-, Gallium-, Germanium-, Uran-, Kaolin-, Graphit- und Zirkonproduktion. Die Fülle und die Vielfalt der Mineralien sind auf die Komplexität der ukrainischen Geologie zurückzuführen. Diese Rohstoffe werden in der Ukraine aufbereitet, und der Großteil der verarbeiteten Rohprodukte wird in die EU und andere Teile der Welt exportiert. Als Folge des Angriffs ging die Mineralproduktion im Jahr 2022 für die meisten Rohstoffe um mehr als 50 % zurück. In diesem Beitrag werden Gründe für den Produktionsrückgang am Beispiel von Eisen, Mangan, Titan, Kaolin und Graphit skizziert und die Auswirkungen auf die Wirtschaft der europäischen Länder, die auf den Import dieser Rohstoffe angewiesen sind, diskutiert.

Keywords/Schlüsselwörter
Raw materials, deposits, geology, Ukraine, war;
Rohstoffe, Lagerstätten, Geologie, Ukraine, Krieg.

1 Einleitung

Die Ukraine verfügt über reiche und vielfältige mineralische Rohstofflagerstätten (vgl. Liventseva 2022, Mykhailov et al. 2022, Unguru et al. 2022). Von den etwa 8000 registrierten Rohstoffvorkommen sind mehr als 3500 Lagerstätten erschlossen und werden von mehr als 2000 Bergbau-, Aufbereitungs- und Verarbeitungsunternehmen betrieben (vgl. Liventseva 2022). Der Reichtum an Bodenschätzen hat die Ukraine zu einem der führenden Länder der Welt in der Rohstoffproduktion und -verarbeitung gemacht. Im Jahr 2021 war die Ukraine bei mehreren Rohstoffen unter den Top 10 der Weltproduzenten (Tab. 1). Rohstoffe machten mehr als ein Drittel der gesamten Warenexporte der Ukraine in die Europäische Union (EU) und weltweit aus. Die EU-Importe von Rohstoffen aus der Ukraine beliefen sich 2021 auf 8,4 Milliarden Euro, was etwa 40 % der von der Ukraine exportierten Rohstoffe entspricht (vgl. Unguru et al. 2022). Die vier wichtigsten von der Ukraine in die EU exportierten Produkte waren Eisenerz, Eisenerzkonzentrat, Schmiedeeisen und Stahl.

Aufgrund der Bedeutung der Ukraine als wichtiger Rohstofflieferant für die europäische Industrie wurde das Ministerium für Ökologie und natürliche Ressourcen der Ukraine im Juli 2021 Mitglied der *European Raw Materials Alliance* (ERMA) (vgl. *Ukrainian Geological Survey* 2023a).

Ziel der Partnerschaft ist die Harmonisierung der regulatorischen Rahmen-bedingungen für den Bergbau in der Ukraine und der EU sowie die Anwendung der Grundsätze des nachhaltigen Bergbaus. Die Partnerschaft beinhaltet unter anderem, dass die Ukraine Mitglied des *European Critical Raw Materials Act* 2030 wird. Das Gesetz ist ein gesamteuropäischer Handlungsplan für die Entwicklung und Verwirklichung der Rohstoffpolitik der EU. Kritische Rohstoffe und die Sicherstellung ihrer kontinuierlichen Versorgung sind wichtige Bestandteile des erfolgreichen und rechtzeitigen Übergangs Europas zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen und der Erreichung der Ziele der Dekarbonisierung, der CO_2-Neutralität der Gesellschaft und Wirtschaft.

Der russische Angriff auf die Ukraine am 24. Februar 2022 hat die Situation schlagartig verändert. Im vergangenen Jahr sind die Gewinnung und die Verarbeitung von Rohstoffen infolge des Kriegsausbruchs drastisch zurückgegangen. Im Folgenden werden, nach einer Einführung in die Geologie der Ukraine, die Produktionslage der Rohstoffe Eisen, Mangan, Titan, Graphit und Kaolin im Hinblick auf die gegenwärtige Situation diskutiert. Die in dieser Studie genannten Daten zur Rohstoffproduktion für 2022 basieren auf wenigen verfügbaren und teilweise widersprüchlichen Quellen und sollten daher kritisch beurteilt werden und nur als Annäherungswerte dienen.

2 Geologie der Ukraine

Der Reichtum und die Vielfalt an mineralischen Rohstoffen sind auf die Komplexität der ukrainischen Geologie zurückzuführen. Der größte Teil des Territoriums der Ukraine nimmt geologisch gesehen die Osteuropäische Plattform ein. Die Plattform setzt sich aus den lithotektonischen Provinzen Ukrainisches Schild, Dnister-Schwarzmeer und Dnipro-Donetsk zusammen (vgl. Bobrov et al. 2006; Abb. 1).

Rohstoff/Aufbereitungsprodukt	**Produktion 2021 (t)**	**Platzierung in der Weltproduktion 2021**	**Prozentualer Anteil an der Weltproduktion 2021**
Eisenerz	83.800.000	6	3,1
Roheisen	21.000.000	9	1,6
Stahl	21.000.000	14	1,1
Ferrosilizium	49.000	15	0,5
Mangan	600.000	6	3,0
Titanschwamm	6.100	5	2,5
Titandioxid produziert aus Ilmenit	316.000	9	3,6
Titandioxid produziert aus Rutil	95.000	3	15,4
Magnesium	10.000	7	1,0
Gallium	1	6	0,2
Germanium	1	5	~1
Kaolin	2.330.000	6	4,7
Graphit	10.000	8	0,9
Bentonit	180.000	11	0,9
Kalk	2.350.000	13	0,5
Salz	1.800.000	21	0,6

Tab. 1: Produktionszahlen ausgewählter Metalle, Industrieminerale und aufbereitete Rohstoffe, die 2021 in der Ukraine hergestellt wurden. Die Zahlen sind den USGS-Rohstoffdaten für 2021 entnommen (*USGS* 2023a).

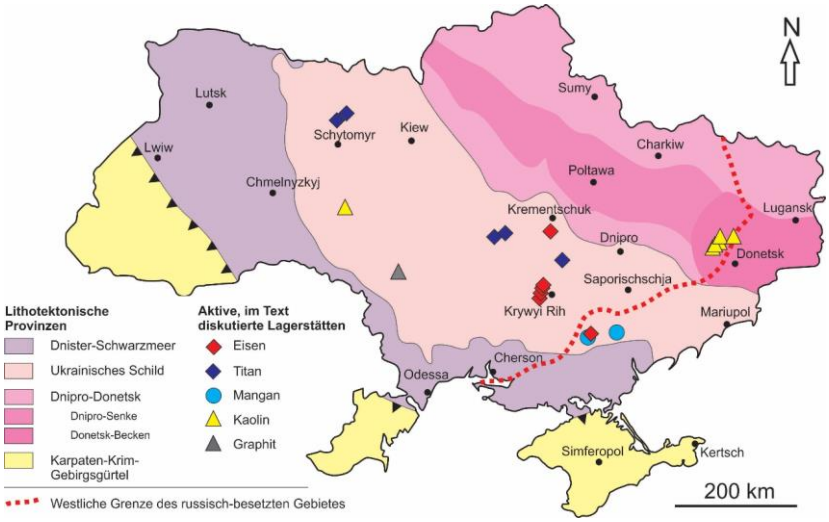


Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte der Ukraine mit den im Text diskutierten Lagerstätten.

Diese Provinzen bestehen aus metamorphen, intrusiven und metasomatischen Gesteinen mit Altern zwischen 3,8–2,1 Milliarden Jahren. Im Südwesten und Süden grenzt die Plattform an den mesozoischen Karpaten-Krim-Gebirgsgürtel. Jeder dieser litho-tektonischen Provinzen und Gürtel bestehen aus bestimmten Gesteinen, die spezifische Typen von Minerallagerstätten aufweisen.

Im Ukrainischen Schild befinden sich die Eisenlagerstätten des Krywyj-Rih-Beckens, sowie Titan- und Uranressourcen. Grünsteingürtel, die im mittleren Dnipro-Gebiet vorkommen, sind durch Goldmineralisierungen charakterisiert. In großen Teilen sind die kristallinen Gesteine des Schildes von paläozoischen, mesozoischen und känozoischen Sedimenten überlagert, in denen große Lagerstätten von Mangan (Nikopol-Becken), Ilmenit-Rutil-Zirkon (Dnipro-Region), Uran, Kaolin, Bentonit, Braunkohle und anderen Rohstoffen vorkommen.

In der Senke von Dnipro sind die kristallinen Gesteine von einer bis zu 6–15 km dicken paläozoischen und mesozoischen Abfolge von Vulkaniten, Evaporiten, klastischen und karbonatischen Sedimenten mit Öl-, Gas-, Steinsalz- und Gipsvorkommen überlagert. Im Südosten geht die Senke in das Donetsk-Becken über, wo sich große Kohle- sowie wichtige Quecksilber- und Fluoritvorkommen befinden.

Die Dnister-Schwarzmeer-Provinz enthält Kupferressourcen in neoproterozoischen Flutbasalten und Fluorit in neoproterozoischen kontinentalen Formationen. Im Süden bildet die Dnister-Schwarzmeer-Provinz eine Senke mit einer bis zu 5 km dicken Sedimentdecke, mit Vorkommen von Kohle, Bauxit, Mangan und polymetallischen Erzen. Im Westen ist das kristalline Grundgebirge von paläozoischen bis känozoischen Sedimenten bedeckt, die Ablagerungen von Kohle, Schwefel, Gips und Phosphoriten enthalten.

Zu den ukrainischen Karpaten gehören die Karpaten-Vorlandsenke mit gas- und ölführenden Sedimenten, die gefalteten Karpaten mit Flyschsedimenten und die Transkarpaten-Senke mit vulkanisch-sedimentären Formationen, die Steinsalz, Zeolithe, Baryte, Alunite, Quecksilber und Polymetallmineralisationen aufweisen. Das Krimgebirge, als Teil des Karpaten-Krim-Orogengürtels, besteht aus gefalteten Trias-Jura-Flyschsedimenten, die von Karbonaten und klastischen Sedimenten des Spät-Mesozoikums und Känozoikums überlagert sind. Diese Sequenzen enthalten Eisenerze in der Kertsch-Region, und Salz- und Kalksteinvorkommen.

3 Eisen

Im Jahr 2021 war die Ukraine der sechstgrößte Eisenerzproduzent der Welt mit einem Anteil von circa 3 % der Weltförderung (Tab. 1; vgl. *USGS* 2023b). Die Eisenerz- und Stahlexporte der Ukraine hatten einen Gesamtwert von 19 Milliarden Euro, was 32 % der Gesamtexporte des Landes entspricht (vgl. *S&P Global Market Intelligence* 2023a). Die Gesamtreserven von Eisenerz in der Ukraine werden auf 27,4 Milliarden Tonnen geschätzt. Die Europäische Union ist zu etwa 15 % auf Eisenerzimporte aus der Ukraine angewiesen, wobei Polen, Tschechien, die Slowakei und Österreich die größten europäischen Importeure sind. China ist der größte Kunde außerhalb Europas.

Die Ukraine gehört ebenfalls zu den wichtigsten Lieferanten von Roheisen, der ersten Aufbereitungsstufe von Eisenerz. Hauptabnehmer von ukrainischem Roheisen sind die USA, gefolgt von Italien, Spanien und der Türkei.

Das Hauptgebiet der Eisenerzindustrie ist die Region Krywyj Rih, geologisch auch als das Eisenerzbecken von Krywyj Rih bekannt. Das Becken ist ca. 100 km lang in N-S-Richtung und zwischen 2 und 7 km

breit, wo sich mehrere große proterozoische Eisenerzlagerstätten befinden (vgl. Stupnik und Shatokha 2021). Es liefert mehr als 90 % der Eisenerzproduktion des Landes.

Der multinationale Stahlhersteller ArcelorMittal Krywyj Rih mit Hauptsitz in Luxemburg ist der größte Eisenerzproduzent in der Krywyj-Rih-Region. ArcelorMittal ist als Gesamtunternehmen der zweitgrößte Stahlproduzent der Welt. In der Ukraine fördert ArcelorMittal Krywyj Rih Eisenerz aus einem 1100 m tiefen Untertagebergwerk und zwei Tagebauen im südlichen Krywyj-Rih-Becken (vgl. *Mining Solutions* 2023a, b).

Northern Mining and Processing Plant (Northern GOK) ist der zweitgrößte Betreiber in der Krywyj-Rih-Region. Er besitzt die Lagerstätten Gannivske, Pervomayskoe und Gleyuvatske mit insgesamt 3,8 Millionen Tonnen Ressourcen. Das Unternehmen betreibt zwei Tagebaue, eine Aufbereitungsanlage und zwei Eisenpelletwerke. Zusammen mit den Unternehmen Ingulets GOK, Central GOK and Southern GOK gehören sie zur ukrainischen Holdinggesellschaft Metinvest, dem größten ukrainischen Unternehmen.

Neben Krywyj Rih gibt es im Krementschuk-Becken in der Poltawa-Region große Eisenerzreserven (4,5 Milliarden Tonnen) und im Eisenerzbezirk Biloserka in der Saporischschja-Region (2,5 Milliarden Tonnen). Im Krementschuk-Becken betreibt das in der Schweiz ansässige Bergbauunternehmen Ferexpo drei Tagebaue. Die Lagerstätten in Biloserka werden unter Tage vom multinationalen Unternehmen Saporischschja-Eisenerzwerk (ZZHRK), einer Holding der Ukraine, der Slowakei und Tschechiens, abgebaut (vgl. Bazaluk et al. 2021, *Zaporizhzhya Iron Ore Plant* 2023, *GMK Center* 2023a). Der vierte ukrainische Eisenerzbezirk ist das Eisenerzbecken Kertsch, in dem derzeit kein Bergbau betrieben wird.

Die geschätzte Eisenerzproduktion sank im Kriegsjahr 2022 um etwa 58 % auf 34 Millionen Tonnen, was etwa 20 Millionen Tonnen Roheisen entspricht (Abb. 2). Die ukrainischen Eisenerzwerke operieren mit weniger als 50 % ihrer Kapazität (vgl. *S&P Global Market Intelligence* 2023a). ArcelorMittal Krywyj Rih musste die Produktion nach plötzlichen Stromausfällen im Herbst 2022 mehrmals einstellen und wiederaufnehmen. Das Unternehmen war gezwungen, den Stromverbrauch stark zu begrenzen und die Stahlproduktion sowie die Produktion von Walzstahlprodukten vorübergehend einzustellen (vgl. *S&P Global Market Intelligence* 2023b). Infolgedessen sank die Stahlproduktion von ArcelorMittal

Krywyj Rih auf etwa 20 % der Kapazität. Im Eisenerzrevier Biloserka war die Produktion von ZZHRK nur 40 % im Vergleich zum Vorjahr (vgl. *GMK Center* 2023a). Die Roheisenproduktion von Metinvest ging in den ersten neun Monaten des Jahres 2022 um 65 % auf 2,5 Millionen Tonnen zurück, während die Stahlproduktion nur 62 % bzw. 2,7 Millionen Tonnen betrug. Metinvest hält eine Mehrheitsbeteiligung an der Azovstal Iron and Steel Works, deren Azovstal-Stahlwerk sich in der Stadt Mariupol befindet, die drei Monate von Russland belagert wurde.

Die Blockade der ukrainischen Schwarzmeerhäfen zwang, die Erz- und Produktlieferungen ausschließlich auf die Schiene zu verlegen. Das führte zu einer plötzlichen Überbelastung des Eisenbahnnetzes speziell an Verkehrsknotenpunkten, die eine solche Menge von Zügen nicht bewältigen konnten. Züge mit Eisenerz, raffinierten Eisen- und Stahlprodukten der Ukraine standen wochenlang in Warteschlangen an den Grenzübergängen (vgl. *S&P Global Market Intelligence* 2023c). Dadurch sind die Logistikkosten und Lieferzeiten deutlich gestiegen. Seit der Etablierung des Getreidetransportkorridors über das Schwarze Meer im Juli 2022 (vgl. *United Nations* 2023) hat sich die Situation verbessert, bleibt aber angespannt. Die Logistikrouten mussten kurzfristig angepasst werden. Polen und Rumänien dienen seither als Transit-knotenpunkte für den Weitertransport per See- oder Schienenweg.

Aufgrund der geringen Produktion und der Seeblockade gingen 2022 die Eisenerzexporte der Ukraine um 46 % auf 24 Millionen Tonnen im Vergleich zum Vorjahr zurück (vgl. *Interfax* 2023). Eisenerz wurde hauptsächlich nach China, Tschechien, Österreich, Polen und in die Slowakei exportiert. Die Roheisenexporte der Ukraine gingen um 59 % auf 1,3 Millionen Tonnen zurück. Die Lieferungen erfolgten hauptsächlich in die USA, die Türkei und nach Polen. Bei einer stabilen Stromversorgung hoffen die Eisenerz- und Stahlproduzenten, im Jahr 2023 wieder 50 % ihrer Kapazität zu erreichen. Eine kontinuierliche Stromversorgung wird im Jahr 2023 der Schlüsselfaktor für die Stabilisierung und schrittweise Erholung der Produktion sein.

4 Mangan

Die Ukraine verfügt über die größten Manganerzreserven in Europa und eine der größten Reserven weltweit. Die Hauptreserven, 626 Millionen

Tonnen, konzentrieren sich im Süden der Ukraine im Nikopol-Manganbecken in der Region Saporischschja (vgl. Strishkov und Levine 1987). Das Becken ist 1 bis 20 km breit. Der sedimentäre Erzhorizont ist durchschnittlich 2 bis 3,5 m mächtig und besteht aus hochgradigen Oxiderzen mit 23–26 % Mangan und minderwertigen Karbonaterzen mit 15–17 % Mangan (vgl. *IndexBox* 2023).

Der Hauptbetreiber ist Pokrov GOK, der mehr als 4000 Mitarbeiter beschäftigt und 70 % des Manganerzes der Ukraine in fünf Tagebauen fördert (vgl. *GMK Center* 2023b). Die Hauptprodukte des Unternehmens sind Mangankonzentrat mit 26 bis 43 % Mangan und Mangansintererz. Die Produkte werden hauptsächlich auf dem ukrainischen Markt verkauft. Die Hauptabnehmer sind die Eisenlegierungswerke Nikopol und Saporischschja. Ein weiterer Manganproduzent ist Marganets GOK, das einzige Bergbauunternehmen in der Ukraine, das Mangan unter Tage abbaut. Die Bergwerke liegen im östlichen Teil des Nikopol-Manganerzbeckens, im Gebiet Gruschevsko-Basansky. Das Unternehmen betreibt fünf Untertagebergwerke, zwei Tagebaue, eine Verarbeitungsanlage und einen Chemieindustriekomplex. Neben dem Manganabbau importiert die Ukraine Manganerz aus Ghana, Belgien und der Slowakei zur Weiterverarbeitung. Die USA, Ungarn und Tschechien waren vor dem Krieg die Hauptabnehmerländer für Manganerz- und Konzentratexporte aus der Ukraine (vgl. *IndexBox* 2023).

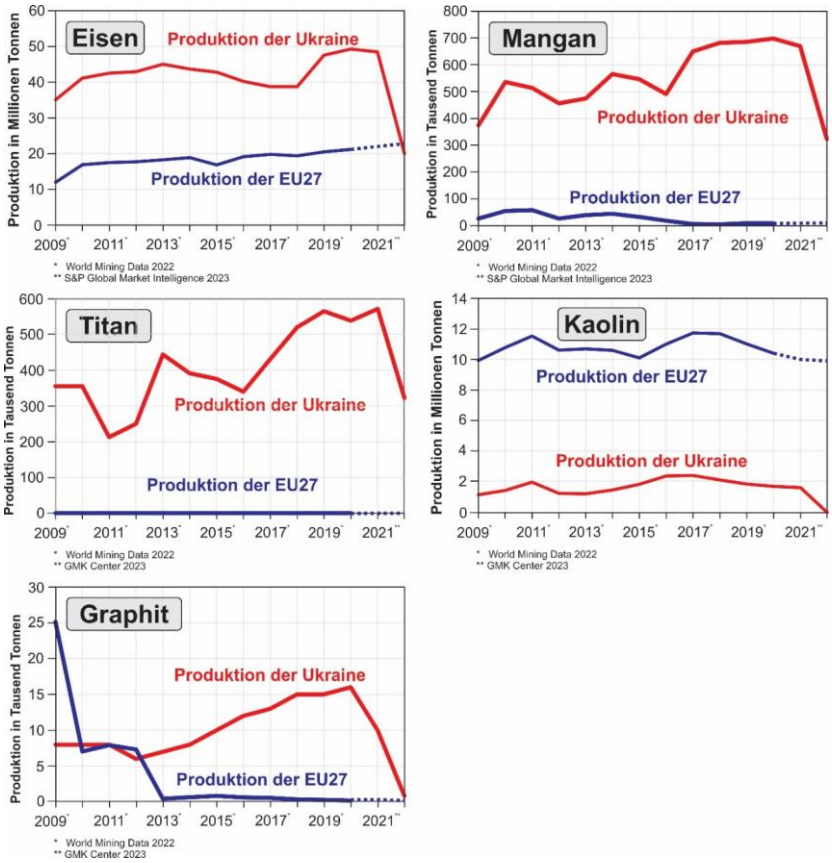


Abb. 2: Die ukrainische Produktion von Eisen, Mangan, Titan, Kaolin und Graphit im Vergleich zur EU27-Produktion von 2009 bis 2022. Die geringe Produktion 2022 reflektiert deutlich die Auswirkungen der russischen Invasion der Ukraine auf den Rohstoffabbau.

Ähnlich wie die Eisenproduktion war auch die Manganproduktion von Stromausfällen, Raketenangriffen und Transportunterbrechungen betroffen. Die Produktionspläne mussten angepasst werden, da viele Arbeiter des Unternehmens, insbesondere Bergleute, in die Streitkräfte der Ukraine eingezogen wurden. Pokrov GOK produzierte in 8 Monaten des Jahres 2022 497.000 Tonnen Mangankonzentrat, was etwa 34 % weniger

im Vergleich zur Vorjahresproduktion ist (Abb. 2). Marganets GOK reduzierte die Produktion von Mangan-konzentrat um 41 % auf 324.000 Tonnen im Vergleich zu 551.000 Tonnen im Vorjahr (vgl. *GMK Center* 2023c). Die Importe von Manganerzen, vor allem aus Ghana, für die Konzentratproduktion gingen im Jahr 2022 um 68 % auf 135.798 Tonnen zurück. Die Ukraine exportierte 2022 kein Manganerz oder -konzentrat (vgl. *Open4Business* 2023).

5 Titan

Die Ukraine verfügt über die größten Titanreserven in Europa und trägt mit seinem Export erheblich zum globalen Titandioxidmarkt bei (Tab. 1). Die Ukraine ist eines der wenigen Länder mit einem geschlossenen Produktionskreislauf in der Titanindustrie, von der Gewinnung von Titanerzen über deren Verarbeitung bis hin zur Herstellung von Fertigprodukten. Titan ist ein leichtes und hartes Metall, das in Luft- und Raumfahrzeugen sowie für militärische Anwendungen wie Kampfjets, Hubschrauber, Marineschiffe, Panzer, Langstreckenraketen usw. verwendet wird. Titan ist von der Europäischen Kommission als kritischer Rohstoff klassifiziert (vgl. *European Commission* 2020). 2021 war die Ukraine der weltweit fünfgrößte Exporteur von Titanerz.

Die Titanproduktion der Ukraine erfolgt aus sedimentären Seifenlagerstätten, aus denen die Titanminerale Ilmenit und Rutil gewonnen werden. Die Minen befinden sich in den Regionen Kiew, Dnipro, Charkiw und Donetsk (vgl. Gursky et al. 2003). Die Seifenablagerungen sind bis zu 5 km lang, 1 km breit und 10 m mächtig. Ilmenitgehalte, beispielsweise, schwanken zwischen 150 und 300 kg/m3 (vgl. Belous 1998). Neben der Produktion von Ilmenit- und Rutilkonzentraten produziert die ukrainische Industrie auch Titanschwamm, -metall und -legie-rungen.

Die United Mining & Chemical Company (UMCC) ist der größte Ilmenitproduzent und der einzige Rutil- und Zirkonabbaubetrieb in Europa. Der Betrieb ist auf zwei Tochtergesellschaften aufgeteilt: Wilnohirsk Bergbau- und Aufbereitungswerk (VMMP) in der Nähe von Dnipro und Irschansk Bergbau- und Aufbereitungswerk (IMPP) in der Nähe von Schytomyr. Die Reserven von Ilmenit betragen 4,4 Millionen Tonnen und von Rutil 274.000 Tonnen. Der Konzentratverkauf belief sich 2020 auf 298.000 Tonnen Ilmenit und 38.000 Tonnen Rutil. Das

Unternehmen exportiert 92 % seiner Produkte in 35 Länder. Das staatliche Unternehmen Zaporozhye Titanium & Magnesium Combine Ltd (ZTMC) produziert Titanschwamm, -metall und -legierungen (vgl. *RMIS* 2023). Das Unternehmen Velta LLC fördert und verarbeitet Titanerz in der Region Kirowograd und nutzt dabei die Ilmenitvorkommen Likarivske und Byrzulivske. Velta hat 2 % des Weltmarktanteils für Titanrohstoffe. Kurz vor dem Krieg baute Velta im Byrzulivske-Seifenfeld einen Bergbau- und Aufbereitungskomplex mit einer Produktionskapazität von 240.000 Tonnen Ilmenitkonzentrat pro Jahr. Das Chemiewerk PJSC Sumykhimprom mit Sitz in der Stadt Sumy produziert Titandioxid und Titanpigment aus Ilmeniterz. Weitere Betreiber sind Valky und Mizhrichensk Ilmenite LLC, beide in der Schytomyr-Region ansässig.

Im Jahr 2022 sank der Export von Titan aus der Ukraine um 42 % auf 322.000 Tonnen (vgl. *GMK Center* 2023d) (Abb. 2). Das ZTMC-Aufbereitungswerk in Saporischschja im Südosten der Ukraine ist seit Mai 2022 wieder unter ukrainischer Kontrolle, liegt jedoch in der Nähe des russisch besetzten Gebiets. Es ist nicht bekannt, ob die Produktionslinie noch in Betrieb ist. Velta musste den Bau des Titanwerks in der Region Dnipropetrowsk stoppen und arbeitete an der Verlagerung seiner Anlagen an einen sichereren Ort. Die Käufer des ukrainischen Titans mussten entsprechend der verfügbaren Infrastruktur gewechselt werden. Die Hauptabnehmer ukrainischer Titanerze waren 2022 Tschechien, Polen, Rumänien und die USA.

Die USA und die verbündeten Nationen entwickeln einen geopolitischen Strategieplan zur Identifizierung, Entwicklung und Nutzung der Titanvorkommen der Ukraine, die für die Entwicklung der Militärtechnologie des Westens von entscheidender Bedeutung sind (vgl. *Newsweek* 2023). Wenn die Ukraine den Krieg gewinnt, werden die USA und ihre Verbündeten in der Position sein, große Titanlagerstätten zu erschließen. Wenn es Russland gelingt, die Vorkommen und Anlagen der Ukraine zu beschlagnahmen, wird Russland seinen globalen Einfluss auf einen immer wichtiger werdenden Rohstoff verstärken, da es bereits selbst ein großer Titanproduzent ist. Die Ukraine ist eines von nur sieben Ländern, die Titanschwamm produzieren, das Ausgangsmaterial für die Titanmetallherstellung. Die Abhängigkeit des Westens von russischem Titan ist so stark, dass das Metall bisher nicht den Sanktionskampagnen der USA, der EU und ihrer Verbündeten gegen Russland unterliegt. Der Luft- und Raumfahrthersteller Boeing hält sein Joint Venture mit der russischen

VSMPO-Avisma aufrecht, dem weltweit größten Titanexporteur, hat jedoch nach der Invasion die Bestellungen eingefroren. Andere, wie der europäische Flugzeugkonzern Airbus, beziehen weiterhin Titan von VSMPO.

6 Kaolin

Die Vorkommen von keramischem Ton (Kaolin) in der Ukraine gehören zu den größten der Welt. Die Gesamtressourcen belaufen sich auf über 600 Millionen Tonnen. Der Großteil der Vorkommen konzentriert sich auf die Donbass-Region in der Nähe von Donetsk und einige Vorkommen in den Regionen Saporoschje und Kirowograd. Der Ton aus der Region Donetsk eignet sich hervorragend für die Herstellung von keramischen Fliesen. Derzeit werden circa 20 Kaolinvorkommen abgebaut (vgl. Galos 2010). Die wichtigsten Export-länder, die hauptsächlich über den Hafen von Mariupol, aber auch über die Häfen Olbia und Mykolajiw beliefert werden, sind Spanien, Italien, Polen und die Türkei.

Die größten Vorkommen befinden sich im Druschkowka-Artemowsk-Gebiet an der Grenze zum russisch besetzten Donetsk-Gebiet. Bei den hier abgebauten Lagerstätten handelt es sich um miozäne Kaolintone mit einer Mächtigkeit von bis zu 4 m, über denen 20 bis 30 m tertiäre und quartäre Sedimente lagern. Die Gesamtressourcen betragen ca. 200 Millionen Tonnen. Tone enthalten 20–50 % Kaolin, 20–80 % Illit und Smektit sowie bis zu 10 % Quarz. In jeder Lagerstätte können 4–14 verschiedene Tonarten unterschieden werden, die selektiv abgebaut werden (vgl. Galos 2010).

Der führende Tonproduzent in der Ukraine ist die VESCO-Gruppe, die im Jahr 2020 2,4 Millionen Tonnen Ton verkaufte. VESCO exportierte 84 % in 18 Länder. Die größten Verbraucher sind Keramikfliesenhersteller in Spanien, auf die über 26 % aller Verkäufe von VESCO entfallen. Neben VESCO haben eine Reihe der führenden Industriemineralproduzenten Europas operative Tochtergesellschaften in der Ukraine gegründet, darunter Sibelco, Imerys und AKW. Die Sibelco-Tochtergesellschaft Donbas Clays PJSC beispielsweise produziert in drei Tagebauen in Mertsalowo 1,3 Millionen Tonnen hochwertigen Ton pro Jahr für die Keramikindustrie. Im Jahr 2020 erweiterte Sibelco sein ukrainisches Portfolio durch die Übernahme des Produzenten Euromineral LLC im

Jassynuwata-Bezirk und des Kurdyumovsky PrJSC in der Donetsk-Region. Ein weiterer Tonproduzent ist TKZ Turbiv Kaolin (vgl. *TKZ Turbiv Kaolin* 2023) in den Regionen Gluschkowski und Turbiv in der Zentralukraine. Das Unternehmen betreibt Kaolin- und Quarzsandvorkommen, die als Rohstoffe für die Herstellung von Porzellan, Sanitärkeramik und Keramikfliesen, Steingut, usw. dienen.

Spanien, der größte Abnehmer von ukrainischem Kaolin für die Herstellung von Keramikfliesen, war vom kriegsbedingten Exportstopp im Frühjahr 2022 am stärksten betroffen. Der Exportstopp hatte jedoch Auswirkungen auf alle europäischen Fliesen-hersteller und Verbraucher. Die europäische Keramikfliesenproduktion hängt stark von weißbrennenden Tonen aus der Ukraine ab. Käufer von ukrainischem Kaolin prüfen alternative Möglichkeiten der Rohstoffversorgung. Das Industriezentrum in der Provinz Castellón produziert 94 % der gesamten Keramikfliesen Spaniens und beherbergt 80 % der in diesem Sektor tätigen Unternehmen (vgl. *IMFORMED* 2023). Etwa 70 % des in dieser Region für die Fliesenproduktion verwendeten Kaolins wurden aus der Ukraine importiert.

Die ukrainischen Häfen Olbia und Mykolajiw wurden am 7. März 2022 von der russischen Armee bombardiert, und die letzte Ladung Ton, 40.000 Tonnen, wurde am 8. März 2022 in Castellón gelöscht (vgl. *IMFORMED* 2023). Da der spanische Vorrat an ukrainischem Ton nur etwa drei Monate reicht, mussten die spanischen Keramikhersteller die Lieferlogistik kurzfristig umstellen, um die Abhängigkeit von ukrainischem Ton zu verringern. Allerdings war das eine Herausforderung angesichts der spezifischen Qualität des ukrainischen Materials, an das die Verarbeitung angepasst werden musste. Das führte zu Qualitäts- und Logistikproblemen bei der Verwendung von Tonen von anderen Lagerstätten, und der Abbau inländischer Vorkommen musste neu etabliert werden. Vor ähnlichen Heraus-forderungen stand die italienische Keramikindustrie. Der erzwungene ukrainische Export-stopp verursachte eine Lücke von 4 Millionen Tonnen im europäischen Kaolinmarkt, die durch andere Rohstoffquellen geschlossen werden musste und zu einem drastischen Preisanstieg von etwa 20 % bis Ende 2022 führte (vgl. *FRED* 2023).

7 Graphit

Die Ukraine ist einer der wenigen Graphitproduzenten in Europa. Das Unternehmen Zavalievsky Graphite & Plant ist der einzige Hersteller von Graphit in der Ukraine, das die Zavalievsky-Lagerstätte in der Kropywnyzkyj-Region abbaut. Die Zavalievsky-Graphitlagerstätte gilt als eine der größten in Europa. Im Jahr 2021 betrug die Produktion 17.000 Tonnen Graphit. Das Unternehmen stellt über 25 Graphitprodukte mit einem Kohlenstoffgehalt von 85 % bis 99,5 % und mit Korngrößen von 10 bis 200 Mikrometern sowie kolloidale Graphitpräparate und Schmier- und Kühlmittel her. Im Juli 2021 erwarb das in Australien ansässige Unternehmen Volt Resources Ltd. eine 70%ige Mehrheitsbeteiligung an Zavalievsky Graphite & Plant, um die Graphitproduktion in Europa zu erweitern und Verarbeitungsanlagen für Batterieanodenmaterial und andere hochwertige Graphitprodukte zu entwickeln. Die Schätzung von Volt Resources zur Tonnage der Graphitmineralisierung im südöstlichen Bereich des Graphitprojekts Zavalievsky beläuft sich auf insgesamt etwa 23 Millionen Tonnen mit einem Kohlenstoffgehalt von 6,8 %.

Obwohl es in der Kropywnyzkyj-Region zu keinen Militäreinsätzen kam, wurden nach der russischen Invasion der Graphitabbau und die Aufbereitung in Zavalievsky eingestellt. Das Personal wurde nach Lemberg und in die umliegenden Gebiete nahe der polnischen Grenze in der Westukraine verlegt. Volt würde die Produktion wiederaufnehmen, aber für die Produktion benötigte Materialien, wie Reagenzien, Mahlpulver usw., sind kaum verfügbar. Auch der Treibstoff ist knapp. Selbst wenn der Betrieb die Produktion beginnen könnte, ist der Transport der Produkte derzeit nahezu unmöglich. Im August 2022 wurden in 14 Tagen 846 Tonnen Graphit gefördert, die Gesamtproduktion des Jahres 2022 (vgl. *Proactive* 2023).

Österreich, die Slowakei, Italien, Tschechien und Weißrussland waren 2022 am stärksten vom Graphitexportrückgang betroffen. Rund 40 % des weltweit abgebauten Graphits werden in der Feuerfestmaterialienproduktion verarbeitet; 35 % werden in der Elektronik, für Brems- und Kupplungsteile, Dichtungen, Flammenschutzmittel und Kohlebürsten genutzt. Anoden für Lithium-Ionen-Batterien machen derzeit zwischen 25 und 30 % des Bedarfs an Graphit aus. Der Graphitbedarf für Batterieanoden wächst jedes Jahr stetig um einige Prozent. Österreich ist der

größte Importeur von ukrainischem Graphit, für die Feuerfestmaterialienproduktion des österreichisch-brasilianischen Unternehmens RHI-Magnesita, dem größten Feuerfestmaterialienproduzenten der Welt. RHI-Magnesita besitzt zahlreiche Graphitminen auf der ganzen Welt und hat seine Rohstoffversorgungslogistik neu geordnet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ukraine ist ein bedeutender Lieferant für den europäischen Markt einer Reihe von Rohstoffen, von denen einige wirtschaftlich kritisch sind, wie Titan und Graphit. Die ukrainischen Exporte von Eisenerz und Eisenprodukten sind sehr wichtig für die Lieferketten der europäischen Stahlindustrie. Die Auswirkungen des Krieges haben auch außerhalb Europas zu Störungen der globalen Wertschöpfungsketten geführt. Die konkreten Gründe für die reduzierte Produktion von mineralischen Rohstoffen im Kriegsjahr 2022 und den Rückgang bzw. Stopp von Rohstoffexporten der Ukraine und dessen Auswirkungen auf die Wirtschaft europäischer Länder und Lieferketten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Unterbrechungen der Energieversorgung aufgrund russischer Raketenangriffe auf Stromerzeugungsanlagen wirkten sich auf das gesamte Energienetz der Ukraine aus und führten zur vorübergehenden Schließung von Bergbau- und Aufbereitungsanlagen.
- Versorgungsmaterialien und Ausrüstung für den Betrieb der Bergwerke, Tagebaue und Aufbereitungsanlagen, die in der Ukraine hergestellt oder importiert werden, sind aufgrund unterbrochener Lieferketten nicht oder schwer verfügbar.
- Viele Arbeiter dienen im Krieg oder haben das Land verlassen.
- Es herrscht ein genereller Mangel an Treibstoff und Generatoren.
- Die Blockade ukrainischer Seehäfen durch Russland von Februar bis Juli 2022 stoppte den Seehandel in den ukrainischen Häfen, einschließlich des Exports und Imports von Rohstoffen, und führte zu Änderungen der Logistikrouten und Lieferketten sowie zu einem Anstieg der Kosten für die Lieferung von Rohstoffen und Produkten bis zum Verbraucher.

- Selbst wenn die Gruben ihre Produktion teilweise wiederaufnehmen könnten, macht der Krieg den Transport von Erzen und verarbeiteten Rohstoffen aufgrund teilweise zerstörter Infrastruktur und unterbrochener Transportwege schwierig und unsicher. Rohstoffproduzenten und -exporteure sind gezwungen, die Handelswege und -partner in kürzester Zeit umzustellen.
- Die europäischen Länder, die am stärksten vom Rückgang der Eisen-, Mangan-, Titan-, Graphit- und Kaolinexporte der Ukraine betroffen waren, sind Tschechien (Eisen, Mangan, Titan, Graphit), Polen (Eisen, Mangan), die Slowakei (Eisen, Graphit), Österreich (Eisen, Graphit), die Türkei (Titan, Kaolin), Spanien (Kaolin), Italien (Kaolin, Graphit) sowie Russland (Eisen, Titan, Graphit und Kaolin).
- Die ukrainische Bergbau- und Aufbereitungstechnik ist teilweise veraltet und erfordert Investitionen und den Einsatz neuer effizienter Bergbau- und Verarbeitungs-technologien. Der Krieg legte diese Investitionen auf Eis.

Um in diesen schwierigen und unsicheren Zeiten Investoren anzuziehen, hat das Parlament der Ukraine im Dezember 2022 die nationale Bergbaureform auf den Weg gebracht (vgl. *Ukrainian Geological Survey* 2023b). Die Reform setzt benutzerfreundliche Regeln für den Zugang zu Bodenschätzen um, aktualisiert die Branchenregulierung und führt eine Reihe moderner digitaler Lösungen ein. Aufgrund des Krieges kommt die Umsetzung der Bergbaureform jedoch nur sehr langsam voran und ausländische Investoren warten auf das Ende des Krieges und die Entspannung der Lage.

Bibliographie

Bazaluk, Ole / Petlovanyi, Mykhailo / Lozynskyi, Vasyl / Zubkohow, Serhii / Sai, Kateryna / Saik, Pavlo (2021): "Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area". *Sustainability* 13, 1–18. https://doi.org/10.3390/su13020834.

Bobrov, Oleksandre B., et al. (2006): *Ukraine: Carpathians and Ukrainian Shield. Geological Excursion Guidebook.* IAGOD International Workshop. ZUKC, Kyiv-Lviv, Ukraine. https://www.researchgate.net/publication/272486747_Ukraine_Carpathians_and_Ukrainian_Shield.

Belous, Yaroslav T. (1998): "Titanium (geology-economic review)". *Geoinform*, 48 S. (in Russisch)

European Commission (2020): *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474.

FRED (2023): *Economic Data Producer Price Index by Industry: Kaolin and Ball Clay*. https://fred.stlouisfed.org/series/PCU2123242123240.

Galos, Krzysztof (2010): "Ball clays for the production of porcelain tiles in Poland". *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 26, 21–43.

GMK Center (2023a): *Zaporizhzhia Iron Ore Plant*. https://gmk.center/en/manufacturer/zaporizhzhia-iron-ore-plant/.

GMK Center (2023b): *Pokrov GOK (Mining and Processing Plant)*. https://gmk.center/en/manufacturer/pokrov-gok-mining-and-processing-plant/.

GMK Center (2023c): *Marganets Mining Reduced Concentrate Production by 41% y/y in 2022*. https://gmk.center/en/news/marganets-mining-reduced-concentrate-production-by-41-y-y-in-2022/.

GMK Center (2023d): *Ukrainian Titanium: The Export of Titanium Ores from Ukraine Decreased by 42% y/y in 2022*. https://gmk.center/en/posts/ukrainian-titanium-the-export-of-titanium-ores-from-ukraine-decreased-by-42-y-y-in-2022/.

Gursky, Dmitry S. / Nechaev, Sergey V. / Bobrov, Alexander (2003): "Titanium deposits in Ukraine focused on the Proterozoic anorthosite-hosted massifs". *Norges Geologiske Undersøkelse Special Publication* 9, 21–26.

IMFORMED (2023): *Industrial Mineral Forums & Research. Industrial Mineral Supply Disruption: Ukraine Crisis*. https://imformed.com/industrial-mineral-supply-disruption-ukraine-crisis/.

IndexBox (2023): *Ukraine – Manganese Ores and Concentrates – Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights*. https://www.indexbox.io/store/ukraine-manganese-ores-and-concentrates-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/.

Interfax (2023): *Ukraine Nearly Halves Iron Ore Exports, Coke and Semi-Coke Down 98% in 2022*. https://interfax.com/newsroom/top-stories/87019/.

Liventseva, Hanna (2022): "The mineral resources of Ukraine". *Tierra y Tecnología* 59. https://dx.doi.org/10.21028/hl.2022.05.17. https:// www.icog.es/TyT/index.php/2022/05/the-mineral-resources-of-ukraine/

Mining Solutions (2023a): *Kryvyi Rih (UG) Mine*. https://miningdataonline.com/property/1787/Kryvyi-Rih-(UG)-Mine.aspx.

Mining Solutions (2023b): *Kryvyi Rih (OP) Mine*. https://miningdataonline.com/property/1786/Kryvyi-Rih-(OP)-

Mine.aspx.

Mykhailov, Volodymyr A. / Hrinchenko, Oleksandr V. / Malyuk, Boris I. (2022): "Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine". *The Green Stone Age: Exploration and Exploitation of Minerals for Green Technologies*, ed. by M. Smelror / K. Hanghøj / H. Schiellerup. London: Geological Society, Special Publications, 526. https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133.

Newsweek (2023): "The Battle for Ukraine's Titanium" by David Bennon 28 January 2023. https://www.newsweek.com/battle-ukraines-titanium-1777106.

Open4Business (2023): *Ukraine Reduced Imports of Manganese Ores to Minimum*. https://open4business.com.ua/en/ukraine-reduced-imports-of-manganese-ores-to-minimum/.

Proactive (2023): *Volt Resources Updates on Zavalievsky Graphite Business in Ukraine*. https://www.proactiveinvestors.com.au/companies/news/1004585/volt-resources-updates-on-zavalievsky-graphite-business-in-ukraine-1004585.html.

RMIS (2023): *Raw Materials Information System – Titanium Metal: Impact Assessment for Supply Security*. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/220616_Briefing_Titanium.pdf.

S&P Global Market Intelligence (2023a): *Metals and the Invasion: Ukrainian Metal-Makers' Woes Grow as Attacks Intensify*. https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/metals-and-the-invasion-ukrainian-metal-makers-woes-grow-as-attacks-intensify-74346692.

S&P Global Market Intelligence (2023b): *Metals and the Invasion: ArcelorMittal Kryvyi Rih Continues ESG Effort Amid War*. https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/metals-and-the-invasion-arcelormittal-kryvyi-rih-continues-esg-effort-amid-war-74380429.

S&P Global Market Intelligence (2023c): *Metals and the Invasion: Ukraine Aims for Critical Minerals after the War*. https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/metals-and-the-invasion-ukraine-aims-for-critical-minerals-after-the-war-74205684.

Strishkov, Vasilii / Levine, Richard M. (1987): *The Manganese Industry of the U.S.S.R.* Washington, DC: U. S. Bureau of Mines/U. S. Government Printing Office.

Stupnik, Mykola / Shatokha, Volodymyr (2021): "History and current state of mining in the Kryvyi Rih iron ore deposit". *Iron Ores*, ed. by

Volodymyr Shatokha. Intechopen. https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.96120.

TKZ Turbiv Kaolin (2023): *TKZ Turbiv Kaolin*. https://tkz-kaolin.com/.

Ukrainian Geological Survey (2023a): *Ukraine-EU Strategic Partnership*. https://www.geo.gov.ua/en/ukraine-eu-strategic-partnership/.

Ukrainian Geological Survey (2023b): "Large mining reform in Ukraine." https://www.geo.gov.ua/en/large-mining-reform-in-ukraine/.

Unguru, Manuela / Georgitzikis, Konstantinos / Ciupagea, Constantin / Garbossa / Elisa (2022): *Ukraine's Trade in Non-Food Raw Materials – Focus on EU-Ukraine Trade Relations*. EUR 31179 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. https://doi.org/10.2760/816082, JRC130392. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/Ukraine_trade%20fiche_JRC_D3_FINAL.pdf.

United Nations (2023): *Black Sea Grain Initiative Joint Coordination Centre*. https://www.un.org/en/black-sea-grain-initiative?gclid=EAIaIQobChMI7-jisaX4_wIV1jgGAB3Y2QBIEAAYASAAEgKAA_D_BwE.

USGS (2023a): *Commodity Statistics and Information*. https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information.

USGS (2023b): *Iron Ore*. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-ore.pdf.

Zaporizhzhya Iron Ore Plant (2023): Home. https://zgrk.com.ua/home/en.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *158 (2023), 101–126*

Rohstoffe für die chemische Industrie: Vorkommen, Aufbereitung und Bedeutung

Gerhard Pfaff
(Berlin, MLS)

Abstract
Raw materials are of fundamental importance to the economies of all countries on earth. In recent years, there have been fundamental changes in the supply and use of raw materials. As a developed industrialized country, Germany has had to adapt to this and will have to adapt to the changing framework conditions to a greater extent in the future. The chemical industry, which is one of the key industries in Germany, is dependent on the supply of raw materials in order to be able to manufacture a wide variety of products that are needed for different applications. The raw materials used in the chemical industry can be classified according to different criteria, e. g., into organic and inorganic raw materials or into fossil and regenerative raw materials. This article deals with the fossil raw materials coal, oil, and natural gas, which are most important for energy production, but above all for the chemical industry, as well as regenerative plant and animal based raw materials such as oils, fats, sugar, starch, and biomass. The focus is on the occurrence, processing and importance of the individual raw materials.

Zusammenfassung
Rohstoffe sind von grundlegender Bedeutung für die Volkswirtschaften aller Länder der Erde. In den letzten Jahren hat es grundlegende Veränderungen bei der Bereitstellung und Nutzung von Rohstoffen gegeben. Deutschland als entwickeltes Industrieland musste sich darauf

einstellen und wird sich zukünftig in verstärktem Maße an die sich ändernden Rahmenbedingungen anpassen müssen. Die chemische Industrie, die zu den Schlüsselbranchen in Deutschland gehört, ist auf die Bereitstellung von Rohstoffen angewiesen, um eine breite Vielfalt an Produkten herstellen zu können, die für verschiedene Anwendungen benötigt werden.

Die in der Chemieindustrie eingesetzten Rohstoffe können nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt werden, z. B. in organische und anorganische Rohstoffe oder in fossile und regenerative Rohstoffe. Der vorliegende Beitrag behandelt die für die Energiegewinnung, aber vor allem auch die für die chemische Industrie wichtigsten fossilen Rohstoffe Kohle, Erdöl, Erdgas sowie regenerative Rohstoffe auf Basis von Pflanzen und Tieren wie Öle, Fette, Zucker, Stärke und Biomasse. Dabei stehen Vorkommen, Aufbereitung und Bedeutung der einzelnen Rohstoffe im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Keywords/Schlüsselwörter
Raw materials, coal, coal hydration, coal gasification, coal degasification, coke oven gas, synthesis gas, crude oil, oil sands, oil shale, natural gas, renewable raw materials, oils, fats, sugar, starch, biomass
Rohstoffe, Kohle, Kohlehydrierung, Kohlevergasung, Kohleentgasung, Kokereigas, Synthesegas, Erdöl, Ölsande, Ölschiefer, Erdgas, regenerative Rohstoffe, Öle, Fette, Zucker, Stärke, Biomasse

1 Einleitung

Die sichere Bereitstellung von Rohstoffen ist für ein industriell hochentwickeltes Land wie Deutschland, aber auch für alle anderen Länder der Erde von außerordentlicher Bedeutung. Vier Branchen dominieren die Industrielandschaft in Deutschland: Automobilindustrie, Maschinenbau, Elektroindustrie und chemische Industrie. Letztere ist die Grundlage für zahlreiche Wertschöpfungsketten, die in nahezu alle anderen Industriezweige hineinreichen. Die chemische Industrie hat damit eine Innovations- und Querschnittsfunktion mit starkem Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit unterschiedlicher Branchen der deutschen Volkswirtschaft. Die sichere Rohstoffversorgung bei gleichzeitig vertretbaren Preisen ist damit von essentieller Bedeutung für die chemische Industrie in Deutschland und stellt eine der größten aktuellen und

zukünftigen Herausforderungen dar. Das Bevölkerungswachstum auf der Erde sowie die industrielle Entwicklung in vielen aufstrebenden Ländern führt bereits heute zu Versorgungsengpässen bei verschiedenen Rohstoffen. Diese Situation wird sich in den kommenden Jahrzehnten nicht wesentlich verbessern. Auf lange Sicht sind die Verknappung und Verteuerung von Rohstoffen vorhersehbar. Damit muss vor allem die chemische Industrie Strategien entwickeln, wie man den Bedarf an organischen und anorganischen Rohstoffen in Zukunft absichern kann.

Ein großer Teil der Wertschöpfung in der chemischen Industrie beruht auf Kohlenstoffverbindungen. Verfügbare Kohlenstoffquellen sind fossile Rohstoffe (Kohle, Erdöl und Erdgas), regenerative Rohstoffe (Öle, Fette, Zucker, Stärke, „Non-Food-Biomasse"), aber auch Kohlendioxid und Carbonate. Vor allem Erdöl ist heute die Grundlage vieler chemischer Produkte. Zugleich ist Erdöl aber der fossile Rohstoff mit der kürzesten zeitlichen Reichweite. Auch wenn man davon ausgehen kann, dass durch neue Funde und verbesserte Förderverfahren weitere Mengen an Erdöl für den Markt bereitgestellt werden, so ist eine sichere zukünftige Belieferung nur noch mit erheblich höherem Aufwand gegeben. Damit ist eine Verbreiterung der Rohstoffbasis eine wesentliche Grundlage für den Erhalt der starken Stellung der deutschen chemischen Industrie.

Man kann heute davon ausgehen, dass Erdöl auch mittelfristig der wichtigste kohlenstoffhaltige Rohstoff für die chemische Industrie sein wird. Mehr und mehr wird es aber dazu kommen, dass andere Rohstoffe Erdöl als Basis für unterschiedliche Produkte ergänzen und ersetzen. Um kurzkettige Olefine als wichtige Zwischenprodukte für unterschiedliche Prozesse bereitzustellen, wird Erdgas eine immer wichtigere Rolle spielen. Auch Kohle wird längerfristig ein wichtiger Rohstoff für die chemischen Industrie bleiben, da es große Lagerstätten und gute Fördermöglichkeiten hierfür gibt. Bei der chemischen Nutzung von Kohle entstehen allerdings große Mengen an unerwünschtem Kohlendioxid. Aktuell werden deshalb verstärkte Anstrengungen zur Weiterverwendung bzw. zur Abtrennung und Lagerung von CO_2 unternommen.

Schließlich muss bei allen Überlegungen berücksichtigt werden, dass der Rohstoffbedarf für die chemische Industrie nicht zu Lasten der Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln gehen darf. Letztere hat bei der weiterwachsenden Bevölkerung auf der Erde eine außergewöhnlich

hohe Bedeutung. Eine Lösung besteht im weiteren Ausbau von Verbundproduktionen von Nahrungs- und Futtermittelindustrie und chemischer Industrie. Zudem geht es darum, Biomasse, die nicht für Nahrung und Futter verwendet wird, für die Erzeugung von Energie, Biogas und Chemikalien einzusetzen.

Wasserstoff, der vorwiegend über die Elektrolyse von Wasser mittels Energie aus Solar- oder Windkraftanlagen produziert wird, ist mittelfristig voraussichtlich ein weiterer wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie. Mit derartig erzeugtem Wasserstoff wäre zudem die umweltfreundliche Umwandlung von Kohle, Kohlendioxid und Biomasse in eine Vielzahl von Produkten möglich.

Grundsätzlich wird es auf Basis bestehender und weiterzuentwickelnder industrieller Prozesse zu einer gemeinsamen und aufeinander abgestimmten Nutzung fossiler und regenerativer Rohstoffe kommen. Das über viele Jahrzehnte erarbeitete Know-how der chemischen Industrie wird dabei genutzt, um großtechnische Verfahren ressourcenschonend und energieeffizient umzugestalten. Die Rohstoffversorgung für die chemische Industrie ist bereits heute eng mit der Bereitstellung von Prozessenergie basierend auf einem Energiemix verbunden. Dieser Mix beinhaltet den Einsatz von Vermögensenergien (gespeicherte Energien, die nur einmal verbraucht werden können, also fossile Brennstoffe und Kernbrennstoffe) sowie Einkommensenergien (Energiequellen, die auf absehbare Zeit unerschöpflich sind, also Sonne, Wind, Wasserkraft, Biomasse, Gezeiten, Geothermie). Die Bereitstellung der Rohstoffe wird mehr und mehr durch einen Rohstoffmix gekennzeichnet sein. Damit verbunden sind innovative Produktionsprozesse wie die biotechnologisch-petrochemische Hybridchemie und die „weiße" oder industrielle Biotechnologie. Derartige Prozesse finden in der chemischen Industrie zunehmendes Interesse, u. a. auch bei der Herstellung von Kunststoffen. So lassen sich mit biobasierten Rohstoffen sowie mit Mikroorganismen und Enzymen komplexe chemische Reaktionen deutlich vereinfachen. Verschiedene Verfahren können auf diese Weise unter milderen Bedingungen durchgeführt werden als im Fall des Einsatzes von konventioneller Technik. Temperaturen und Drücke sind oft niedriger, die Mengen an organischen Lösemitteln sowie an unerwünschten Nebenprodukten können reduziert werden.

Da für die Nutzung von Erdöl, Erdgas und Kohle, aber auch von Ölsanden und Ölschiefer durch den Menschen ein weit in die Zukunft

reichender Zeitraum anzunehmen ist, sind Forschungsaufwendungen zur Gewinnung und zum Einsatz all der genannten fossilen Rohstoffe in Gegenwart und Zukunft von großer Wichtigkeit. Der Zeithorizont für die Nutzung dieser Rohstoffe kann allein mit der Erhöhung der Ausbeute durch verbesserte Erkundungs- und Fördertechniken deutlich erweitert werden. Ein weiterer Aspekt ist der immer stärkere Verzicht von Vermögensenergieträgern in der Energiewirtschaft, so dass diese längerfristig als Rohstoffe für die chemische Industrie zur Verfügung stehen.

Bei den anorganischen Rohstoffen sind vor allem Metalle und Mineralien von großer Bedeutung. Auch hier geht es zukünftig um die Verbesserung der Verfahren für die Erkundung und Gewinnung. Eine wichtige Aufgabenstellung dabei ist die Erhöhung der Ausbeute, das Auffinden neuer Lagerstätten sowie die Nutzung bekannter, bisher aber nicht als wirtschaftlich sinnvoll erachteter Vorkommen. Zudem geht es darum, die Menge des durch Recycling zurückgewonnenen Materials mittels geeigneter Trenn- und Aufbereitungsverfahren signifikant zu erhöhen. Bei unterschiedlichen Anwendungen gibt es Anstrengungen, Materialien durch besser zur Verfügung stehende und kostengünstigere Rohstoffe zu ersetzen.

Mit den weitreichenden Veränderungen auf dem Sektor der Rohstoffbereitstellung gehen verstärkte Anstrengungen in verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsbereichen einher (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). Das betrifft die Grundlagenforschung im Bereich der Stoffumwandlung (Verbesserung bestehender und Schaffung neuer Wertschöpfungsketten), die Entwicklung von großtechnisch nutzbaren Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff (ohne Kohlendioxid als Nebenprodukt), die verstärkte Erforschung der Katalyse und der Biokatalyse mit dem Ziel einer höheren Energie- und Ressourceneffizienz (einschließlich der Reaktions- und Verfahrenstechnik) sowie die Umsetzung der Forschungsergebnisse in neue ökonomisch und ökologisch nachhaltige Produkte und Technologien.

Im Folgenden sollen ausgewählte fossile und regenerative Rohstoffe in Bezug auf Verfügbarkeit, Stand der Technik, technisch-wissenschaftliche Herausforderungen sowie Entwicklungsrichtungen vorgestellt werden.

2 Rohstoff Kohle

Kohle wird seit Jahrhunderten als Träger fossiler Energie vom Menschen genutzt. Bei ihrer Verbrennung entsteht Wärme, die sich vergleichsweise einfach zum Heizen nutzen lässt. Die Verbrennung von Kohle gehört zudem weltweit zu den am meisten verbreiteten Techniken zur Erzeugung elektrischer Energie. Von den Anfängen der chemischen Industrie an war Kohle die wichtigste Rohstoffquelle für viele Prozesse. Erst Mitte des 20. Jahrhunderts wurde sie durch preisgünstigere Rohstoffe aus dem Bereich der Petrochemie abgelöst. Bis heute jedoch ist Kohle ein bedeutender Ausgangsstoff in der chemischen Industrie geblieben. Sie wird sowohl bei der Koks- und Graphitherstellung als auch bei der Gewinnung flüssiger Kohlenwasserstoffe und bei der Eisenverhüttung eingesetzt.

Deutschland verfügt über beträchtliche Vorkommen an Braun- und Steinkohle. Diese werden aktuell vor allem für die Energieerzeugung (Kohleverstromung) und in der Eisen- und Stahlerzeugung verwendet. Während die Braunkohle grundsätzlich zu wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen gewonnen werden kann, ist die Förderung von Steinkohle von Subventionen abhängig. Da von einer zukünftigen Verringerung der Erdölvorräte auszugehen ist, behält Kohle neben Erdgas und Biomasse eine wichtige Bedeutung für die chemische Industrie. Braunkohle hat einen Kohlenstoffgehalt von etwa 65%, während Steinkohle einen Anteil an Kohlenstoff von bis zu 90% aufweist (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). Bei der Energieerzeugung aus Kohle sowie bei vielen chemischen Verfahren, bei denen Kohle als Rohstoff eingesetzt wird, entsteht Kohlendioxid in beträchtlichen Mengen. Industrielle chemische Prozesse werden deshalb heute so gestaltet, dass die für die Reaktionen benötigte Energie und der Ausstoß an Kohlendioxid so gering wie möglich sind. Damit werden hohe Wirkungsgrade erreicht. Gleichzeitig kommt der in der Kohle enthaltene Gehalt an Kohlenstoff so effektiv wie möglich zum Einsatz.

Für die Umwandlung von Kohle in chemische Produkte, vor allem in Kraftstoffe, stehen drei technisch ausgereifte Primärverfahren zur Verfügung:

- Kohlehydrierung (Kohleverflüssigung, Coal-to-Liquid): für Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Kerosin) und flüssige organische Grundchemikalien

- Kohlevergasung: für Gemische aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas)
- Kohleentgasung (Verkokung, Pyrolyse): für Koks sowie flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe

Zudem gibt es Sekundärprozesse, bei denen Produkte aus den Primärverfahren wie Gas, Steinkohlenteer oder Kohleöl eingesetzt und zu verschiedenen chemischen Produkten umgesetzt werden.

Durch den Angriff Russlands auf die Ukraine 2022 hat sich die Bereitstellungssituation für Energie in Deutschland dramatisch verändert. Der Wegfall von Importen an Erdöl und Erdgas aus Russland hat dazu geführt, dass Deutschland größere Mengen an Steinkohle importiert. Nach Angaben des Vereins der Kohlenimporteure (VDKI) stieg die importierte Menge 2022 um acht Prozent auf 44,4 Millionen Tonnen (vgl. Süddeutsche Zeitung 2023). Wichtigster Lieferant war allerdings immer noch Russland mit 13 Millionen Tonnen (Rückgang um 37 Prozent). Seit August 2022 ist die Einfuhr russischer Kohle in die EU wegen des Ukraine-Krieges verboten. Mit 9,4 Millionen Tonnen waren die USA nach Angaben des VDKI das zweitwichtigste Lieferland im Jahr 2022 (Anstieg im Vergleich zum Vorjahr um 32 Prozent), gefolgt von Kolumbien und Australien. Durch die wegfallenden Gaslieferungen aus Russland setzt Deutschland nun mehr Kohle zur Stromerzeugung ein. Hierfür wurden inzwischen wieder Kraftwerke aus der Reserve geholt, die zunächst bis Ende März 2024 in Betrieb bleiben dürfen (vgl. Zeit Online 2022).

2.1 Kohlehydrierung

Die Kohlehydrierung (Kohleverflüssigung) ist ein carbochemisches Verfahren zur Umwandlung von Braun- oder Steinkohle in synthetische Kraftstoffe und flüssige organische Grundchemikalien. Besondere technologische Bedeutung haben die direkte Hydrierung der Kohle mit Wasserstoff nach dem Bergius-Pier-Verfahren und die indirekte Umwandlung durch Kohlevergasung nach dem Fischer-Tropsch-Prozess. Die Verfahren der Kohlehydrierung gewinnen immer dann an Bedeutung, wenn Erdöl nicht in genügenden Mengen zur Verfügung steht. Auch eine angestrebte Unabhängigkeit bei der Bereitstellung von Energie und die nationale Energiesicherheit von Ländern, die ausreichende Kohlevorräte besitzen, spielen beim Betrieb von Anlagen zur Kohlehydrierung eine wichtige Rolle. Das Interesse der chemischen Industrie am Betrieb

von Kohleverflüssigungsanlagen besteht darin, den Feststoff Kohle in flüssige Kohlenwasserstoffe überführen zu können. Damit können Produkte auf Basis von Erdöl durch kohlebasierte Produkte ersetzt werden. Die Kohlehydrierung ist ein Verfahren, bei dem gemahlene Kohle in Schmieröl suspendiert und bei hohem Druck und Temperaturen um 450 °C in Anwesenheit pulverisierter metallischer Katalysatoren zu einem Gemisch flüssiger Kohlenwasserstoffe umgesetzt wird.

In Bezug auf Kohleart und Kohlequalität bestehen bei der Kohlehydrierung höhere Anforderungen als bei der Kohlevergasung. So können nur niedrig-inkohlte Braunkohlen und spezielle Steinkohlen (Flamm-, Gasflamm- und Gaskohle) direkt mit Wasserstoff verflüssigt werden (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). Die Aufarbeitung der entstehenden Kohleöle zu Kraftstoffen und Chemierohstoffen stellt hohe Ansprüche an die Raffiniertechnik. Insgesamt müssen bei der Kohlehydrierung bedeutende Mengen an Wasserstoff bereitgestellt werden. Eine wirtschaftlichere Durchführung der Prozesse ist möglich, wenn die Hydrierung mit einer Kokerei kombiniert wird und der Wasserstoff im Kokereigas genutzt werden kann. Vorteilhaft bei der Weiterverarbeitung des anfallenden Kohleöls ist auch der Verbund von Anlagen zur Hydrierung mit Erdölraffinerien.

Der Vergleich der direkten Kohleverflüssigung mit der indirekten Kohleverflüssigung über Kohlevergasung und nachfolgende Fischer-Tropsch- oder Methanol-Synthese zeigt thermodynamische Vorteile des direkten Verfahrens. Damit können mit dem direkten Verfahren günstigere Wirkungsgrade erreicht werden. Sowohl beim direkten als auch beim indirekten Prozess liegt wesentliches Verbesserungspotenzial in der Entwicklung effektiverer Katalysatorsysteme, die zur Verbesserung in Bezug auf die Selektivität und die Ausbeute der entstehenden Produkte beitragen.

2.2 Kohlevergasung

Die Herstellung von Synthesegas durch Kohlevergasung erfolgt über einen seit Jahrzehnten erprobten technischen Prozess. Zu einem beträchtlichen Teil wird die Kohlevergasung zur Versorgung von Kraftstoffanlagen (z. B. in Südafrika) und für die kohlebasierte Chemieproduktion (z. B. in China) genutzt. Außerdem wird die Kohlevergasung zur

Versorgung von Kraftwerken und für Anlagen zur Gaserzeugung eingesetzt.

Wichtige Chemikalien, die unter Verwendung von Synthesegas erzeugt werden, sind Ammoniak und Methanol. Beträchtliche Mengen des benötigten Synthesegases sind kohlebasiert. Das in den Vergasungsanlagen produzierte Synthesegas muss für die weitere Verwendung zunächst mit Verfahrensschritten wie Entstaubung und Entschwefelung aufgearbeitet werden. Zudem kommt der Einstellung des CO/H_2-Verhältnisses eine besondere Bedeutung zu. Der Energiebedarf für den Vergasungsprozess wird durch Verbrennen von eingesetzter Kohle gedeckt, was für das Verfahren günstig ist, aber ungünstiger Weise gleichzeitig zu hohen CO_2-Emissionen führt. Ansätze, die zur Vergasung erforderliche Energie über die Wärme von Kernkraftwerken bereitzustellen, machen nach der Abschaltung entsprechender Anlagen in Deutschland keinen Sinn mehr.

Anlagen zur Kohlevergasung sind technisch sehr anspruchsvoll und vor allem dort ökonomisch zu betreiben, wo große Mengen an Synthesegas produziert werden und Rohstoffe günstig zugänglich sind. Technologische Weiterentwicklungen konzentrieren sich auf die Optimierung der einzelnen Prozessschritte, die Verringerung des apparativen Aufwandes, die bessere Beherrschung der in der Vergasereinheit ablaufenden Transportprozesse und die Verringerung der entstehenden CO_2-Mengen. Forschung und Entwicklung richten ihr Interesse auch auf den Einsatz von für die Nahrungsmittelproduktion ungeeigneten nachwachsenden Rohstoffen sowie von organischen Rest- und Abfallstoffen anstelle von Kohle. Diese könnten dann auch in Kombination mit Kohle eingesetzt werden. Hierzu sind entsprechende Prozessanpassungen notwendig, um ein ähnliches Fließverhalten aller beteiligten Einsatzstoffe zu erreichen.

Das in Kohlevergasungsanlagen hergestellte Synthesegas wird nicht nur für die Erzeugung von Ammoniak und Methanol eingesetzt. Wichtige weitere Produkte auf Basis von Synthesegas sind Kraftstoffe, Dimethylether und Essigsäure. Die Kohlevergasung war in Deutschland in den letzten Jahrzehnten durch die vergleichsweise kostengünstige Bereitstellung von Erdgas, insbesondere aus Russland, wirtschaftlich nicht attraktiv und konkurrenzfähig. Inzwischen hat sich die Situation dramatisch geändert. Deutschland bezieht kein Erdgas mehr aus Russland. Außerdem sind die Weltmarktpreise für Erdgas stark gestiegen. Mit Engpässen

in der Erdgasversorgung in der Zukunft ist zu rechnen. Unter diesen veränderten Bedingungen erscheint es sinnvoll, verstärkt Möglichkeiten für die Kohlevergasung in Deutschland zu prüfen, die als Alternativen zu anderen Optionen, z. B. zum Bezug von LNG (Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Erdgas) aus dem Ausland, in Betracht kommen. Hierbei wäre die Integration der Vergasungstechnologie in bestehende chemische Großanlagen, vor allem in Raffinerien, zu berücksichtigen. Eine solche Integration beinhaltet auch verbesserte und alternative Konversionsverfahren für das Synthesegas, um Olefine, Aromaten und gesättigte Kohlenwasserstoffe wirtschaftlich und umweltfreundlich herstellen zu können.

2.3 Kohleentgasung

Bei der Kohleentgasung (Verkokung, Pyrolyse) entstehen Gasgemische, die C_1- bis C_4-Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf sowie Wasserstoff enthalten. Zusätzlich können Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Halogene anfallen. Die genaue Zusammensetzung der Gasgemische richtet sich nach der Qualität der eingesetzten Kohle und nach den gewählten Reaktionsparametern. Um die Gasgemische für chemische Synthesen einsetzen zu können, sind verschiedene Aufarbeitungsschritte nötig, bei denen am Ende reine CO/H_2-haltige Mischungen mit einem bestimmten CO/H_2-Verhältnis vorliegen. Mittels unterschiedlicher Synthesen, die teilweise auch als indirekte Kohleverflüssigung bezeichnet werden, gelingt es, aus diesen CO/H_2-Gemischen Produkte herzustellen, die für die chemische Industrie von außerordentlich großer Bedeutung sind:

- Fischer-Tropsch-Synthese (Fischer-Tropsch-Verfahren, FT-Synthese): Kraftstoffe (Otto- und Dieselkraftstoffe), Wachse, Motoröle, Chemierohstoffe wie Ethen, Propen und höhere Olefine sowie sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe wie Ethanol, Aceton und höhere Alkohole
- Methanol-Synthese: Methanol, verschiedene chemische Grundchemikalien
- Hydroformylierung (Oxo-Synthese, Roelen-Synthese): Alkohole, Aldehyde, organische Säuren, verschiedene chemische Rohstoffe
- Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren): Ammoniak

Bei diesen Verfahren spielt die Wahl geeigneter Katalysatoren und optimierter Prozessparameter eine entscheidende Rolle, um qualitativ hochwertige Produkte bei hohen Ausbeuten zu erhalten.

Kohleentgasungsprozesse sind die ältesten Veredlungsverfahren für Braun- und Steinkohle. Besondere Bedeutung hat die Pyrolyse bis heute für die Gewinnung von Koks. Bei der Pyrolyse von Steinkohle entstehen neben dem Hauptprodukt Koks Kokereigas (wird zur Deckung des Energieverbrauchs verbrannt) und Steinkohlenteer (wird der Aufarbeitung zugeführt). Der produzierte Koks kommt vorwiegend bei der Stahl- und Eisenherstellung zum Einsatz.

Der bei der Kohleentgasung anfallende Steinkohlenteer ist als Rohstoffquelle für die chemische Industrie von großer Bedeutung, z. B. für aromatische Verbindungen wie Naphthalin- und Anthracen-Derivate. Steinkohlenteerpech, das ebenfalls zugänglich ist, findet bei der Herstellung von Ruß- und Graphitelektroden Verwendung.

Eine weitere Verwendung des bei der Kohleentgasung entstehenden Kokses besteht in dessen Umsetzung mit Calciumoxid zu Calciumcarbid im Lichtbogenofen (elektrothermisches Verfahren). Bei der Reaktion des Calciumcarbids mit Wasser entsteht Ethin (Acetylen), dass als chemischer Grundstoff in großen Mengen benötigt wird, z. B. bei der Herstellung von Acetylenruß und Kalkstickstoff sowie für unterschiedliche organische Chemikalien wie Butandiol. Eine weitere wichtige Anwendung von Acetylen findet sich beim Schweißen in der Metallverarbeitung. Die Entwicklung der Petrochemie hat allerdings die kohlebasierte Acetylenchemie in den letzten Jahrzehnten stark zurückgedrängt. Mit den in Zukunft zu erwartenden geringeren zur Verfügung stehenden Erdölmengen für die chemische Industrie könnte sich diese Entwicklung allerdings zumindest wieder teilweise umkehren. Dabei besteht jedoch die Aufgabe, neue Ansätze zu finden, die zu einer Verringerung des Energieverbrauchs und zu einer Verminderung der Umweltbelastung führen. Hierzu könnten Verfahren mit autothermer Reaktionsführung oder Entwicklungen, die die Calciumcarbidsynthese in Prozesse zur Energiegewinnung integrieren, beitragen.

Die Kohleentgasung wird über die Bereitstellung von Koks auch zukünftig für die Stahl- und Eisenerzeugung von Bedeutung sein. Das Nebenprodukt Steinkohlenteer wird damit auch weiterhin als Rohstoff für unterschiedliche Chemikalien zur Verfügung stehen. Im Zuge der Errei-

chung der Klimaziele für die nächsten Jahrzehnte werden inzwischen allerdings verstärkt Aktivitäten in Forschung und Entwicklung unternommen, um Koks bei der Eisenverhüttung zu Stahl als Reduktionsmittel zu ersetzen und damit nachhaltig die Freisetzung von CO_2 zu reduzieren. Hierfür kommt in erster Linie Wasserstoff in Betracht, der mit sog. erneuerbaren Energien erzeugt wird („grüner Wasserstoff"). In Schweden gibt es dafür bereits ein Pilotprojekt. Für 2023 ist der Start der industriellen Stahlproduktion mit Wasserstoff vorgesehen (vgl. Bartels 2020).

Um in Zukunft klimaneutral zu produzieren, stellt auch die Thyssenkrupp AG in Deutschland die Stahlproduktion grundlegend um. Eine entscheidende Komponente dabei ist der Aufbau von Direktreduktionsanlagen (DR-Anlagen). thyssenkrupp Steel beauftragte im März 2023 die SMS Group mit dem Engineering, der Lieferung und dem Bau einer wasserstoffbetriebenen Direktreduktionsanlage, zweier innovativer Einschmelzer und zugehöriger Nebenaggregate am Standort Duisburg. Mit diesem Konzept verbunden ist die Produktion von 2,5 Millionen Tonnen an direktreduziertem Eisen. Die Inbetriebnahme der mit Wasserstoff betriebenen Anlage ist für Ende 2026 geplant. Man geht heute davon aus, dass die jährlichen CO_2-Einsparungen bei über 3,5 Millionen Tonnen liegen (vgl. thyssenkrupp Steel 2023)

3 Rohstoff Erdöl

Organische Chemieprodukte werden heute vorwiegend auf Basis des Rohstoffs Erdöl hergestellt. Erdöl besteht ebenso wie die nichtkonventionellen fossilen Rohstoffe Ölsand, Ölschiefer und Schweröl aus Gemischen höherer Kohlenwasserstoffe. Alle diese Rohstoffe sind auch die Basis für die Produktion von Benzin, Dieselkraftstoff, Flugturbinenkraftstoff sowie von Heizöl für die Gebäudeheizung und den Betrieb von Heizkraftwerken. Erdöl hat im Vergleich mit Ölsanden, Ölschiefer und Schwerölen allerdings eine wesentlich größere wirtschaftliche und technische Bedeutung. Wenn es zur erwartbaren zukünftigen Verringerung der Erdölfördermengen kommt, dann dürften Ölsande, Ölschiefer und Schweröle als alternative Rohstoffe eine deutlich größere Bedeutung erlangen.

Der globale Jahresverbrauch an Erdöl belief sich 2022 auf etwa 5 Milliarden Tonnen bzw. 36,5 Milliarden Barrel. In Deutschland wurden 2021 etwa 95,5 Millionen Tonnen Erdöl verbraucht (vgl. Statista 2022).

Durch die geringen Erdölreserven in Deutschland liegt die Importquote bei mehr als 95%. Die globale Reichweite von Erdöl wird auf 40 Jahre geschätzt. Schätzungen zu den weltweiten Ölreserven im Jahr 2020 gehen von 244 Milliarden Tonnen an Erdölreserven (technisch und wirtschaftlich gewinnbar) aus. Zudem werden 502 Milliarden Tonnen an Ölressourcen (nachgewiesen oder geologisch möglich, aber derzeit technisch oder wirtschaftlich nicht gewinnbar) angenommen (vgl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2020).

Erdölvorkommen bestehen aus einem hochkomplexen Gemisch von Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Verbindungen, die je nach Zusammensetzung Heteroatome wie Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff, aber auch Metalle wie Vanadium und Nickel enthalten. Bei der Aufbereitung wird Erdöl in einem ersten Schritt durch Rektifikation in Fraktionen mit unterschiedlicher Siedetemperatur zerlegt. Im nächsten Schritt werden die erhaltenen Fraktionen durch zumeist katalytisch unterstützte Verfahren in Kraftstoffe und Heizöle umgewandelt. Verfahren wie das Steamcracken von Leichtbenzin und das Reformieren von Schwerbenzin werden angewendet, um unterschiedliche Basisprodukte der chemischen Industrie herzustellen.

Steamcracken von Leichtbenzin ist ein petrochemischer Prozess, bei dem Kohlenwasserstoffe in Gegenwart von Wasserdampf bei Temperaturen von etwa 850 ^{o}C ohne Katalysator gecrackt werden. Dabei entstehen die leichten Olefine Ethen und Propen sowie die Nebenprodukte Methan und Wasserstoff. Je nach Reaktionsführung werden als Nebenprodukte auch C_4-Kohlenwasserstoffgemische und Pyrolysebenzin (enthält aromatische Kohlenwasserstoffe wie Benzol, Toluol und Xylole) gebildet.

Beim Reformieren von Schwerbenzin werden mittels platinhaltiger Katalysatoren ebenfalls Aromaten wie Benzol, Toluol und Xylole produziert. Zudem entstehen hierbei erhebliche Mengen an Wasserstoff. Diese können in Ölraffinerien zur Entfernung von Schwefel und Stickstoff durch katalytisches Hydrotreating eingesetzt werden. Dabei werden hochwertige Kraftstoffe und verschiedene Basischemikalien erzeugt. Außerdem können bei diesem Prozess Olefine zur Stabilitätsverbesserung gesättigt und der Aromatengehalt je nach Zielprodukt reduziert werden.

Die über das Steamcracken und Reformieren zugänglichen Olefine und Aromaten gehören zu den wichtigsten vom Erdöl abstammenden

chemischen Basisverbindungen, die für unterschiedliche Wertschöpfungsketten von enormer Bedeutung sind. Durch die zunehmenden Unsicherheiten bei der Bereitstellung von Erdöl – die Einstellung des Imports von russischem Erdöl durch Deutschland in Folge des Ukraine-Konfliktes ist hierbei nur ein Faktor – muss eines der Entwicklungsziele der deutschen chemischen Industrie darin bestehen, Olefine und Aromaten zukünftig auch aus anderen Rohstoffen herzustellen. Insbesondere Methan aus Erdgasen sowie Ethan, Propan und Butan aus nassen Erdgasen kommen dafür in Betracht (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). Weitere Möglichkeiten bestehen in der Nutzung von Kohle sowie von Schwerölen und Rohölen aus Ölsanden und Ölschiefern. Die Umstellung der auf Erdöl basierten Verfahren auf die anderen genannten fossilen Rohstoffe ist mit grundlegenden Verfahrensänderungen verbunden. Eine Möglichkeit besteht dabei darin, kurzkettige Alkane durch Dampfreformieren oder partielle Oxidation ausgehend von Erdgas in Synthesegas umzuwandeln. Letzteres wiederum kann als Ausgangsstoff für die Herstellung verschiedener chemischer Produkte genutzt werden. Die direkte Umwandlung von kurzkettigen Alkanen zu anderen organischen Basisprodukten ist herausfordernd, da Methan, Propan und Butan eine hohe thermodynamische Stabilität aufweisen.

Die stärkere Verwendung von Schwerölen für Chemieprodukte anstelle von Erdöl hängt vor allem von der Entwicklung verbesserter katalytischer Prozesse ab. Diese sind für Crackverfahren wichtig, bei denen Schweröle in leichtere Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden. Außerdem geht es um verbesserte Katalysatoren für die Entfernung von Heteroatomen aus den aufzubereitenden Ölen. Eine zunehmende Bedeutung erlangt auch die Steigerung des Entölungsgrades von Schwerölen durch Einsatz geeigneter Chemikalien bei der Ölgewinnung. Die Weiterentwicklung derartiger Techniken, die unter dem Begriff „tertiäre Fördertechniken“ (auch als „Enhanced Oil Recovery“ bezeichnet) zusammengefasst werden, soll einen wesentlichen Beitrag zur längeren Nutzung von Erdölvorräten leisten (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). Immer wichtiger wird auch die erneute Ausbeutung bekannter Erdöllagerstätten, die früher häufig nur zu 30 bis 40 Prozent ausgeschöpft wurden, mit modernen Techniken.

Wichtige Methoden der tertiären Erdölförderung sind thermische Fördertechniken, das Einpressen von Gasen (z. B. CO_2) und die Injek-

tion von Chemikalien. Mit diesen Techniken kann der Druck im Ölvorkommen und die Gleitfähigkeit des Erdöls beeinflusst werden, wodurch die Förderrate erhöht wird. Zu den eingesetzten Chemikalien gehören Tenside (Verbesserung der Beweglichkeit der Öltröpfchen durch Reduzierung der Kapillarkräfte) und wasserlösliche Hochpolymere (Erhöhung der Viskosität des Flutwassers und damit Erleichterung des Herauspressens des Öls aus den Gesteinsporen).

Zur Erhöhung der Ölausbeute bei Ölsanden sind vor allem Verbesserungen in Bezug auf das Agglomerations- und Segregationsverhalten von Partikeln in den bei der Förderung vorliegenden hochviskosen, stark ölhaltigen Medien notwendig. Weitere Entwicklungen betreffen die energieeffiziente und umweltschonende Abtrennung der Sande vom Öl. Um Vorkommen von Ölschiefer in Zukunft besser nutzen zu können, müssen diese in selektiver Weise besser zerkleinert werden. Letztlich geht es sowohl bei den Ölsanden als auch beim Ölschiefer darum, die vorhandenen Förder- und Aufbereitungstechniken zu verbessern, um wirtschaftlicher und technisch effizienter zu sein.

4 Rohstoff Erdgas

Erdgas ist ein Rohstoff, der überwiegend aus Methan besteht. Die Lagerstätten bestehen entweder aus reinem Erdgas oder aber aus gemeinsamen Vorkommen mit Erdöl. Erdgas enthält neben Methan vor allem die höheren Alkane Ethan, Propan und Butan. Häufig können diese bei der Aufbereitung in geringen Mengen im Erdgas verbleiben, wodurch sich dessen Heizwert erhöht. In den Fällen, in denen man sie vom Methan abtrennt, bezeichnet man die höheren Alkane und die weiteren separierten Bestandteile als Erdgaskondensate.

In Deutschland gibt es, anders als bei Erdöl, durchaus nennenswerte Erdgasvorkommen. Der Erdgasverbrauch in Deutschland lag 2021 bei etwa 80 Milliarden Kubikmetern, die inländische Erdgasförderung bei 5,7 Milliarden Kubikmetern (vgl. Statista 2023). Deutschland verfügt nach heutiger Einschätzung über rund 36 Milliarden Kubikmeter Erdgasreserven, von denen man annimmt, dass sie sicher oder wahrscheinlich förderbar sind (vgl. Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. 2023). Bis 2022 erfolgte ein großer Teil der Erdgasimporte aus Russland. Inzwischen hat es deutliche Veränderungen bei den Erdgasimporten gegeben. Die größten Mengen bezieht Deutschland aus Norwegen.

Weitere wichtige Lieferländer sind die Niederlande und zu einem kleineren Anteil auch Belgien. Mittelfristig liegt das größte Potenzial für Erdgasimporte voraussichtlich im LNG, dem unter hohen Druck tiefgekühlten und per Schiff transportierten Flüssigerdgas. Bisher importiert Deutschland vor allem LNG aus den USA. Die USA sind 2022 zum weltweit größten LNG-Exporteur geworden, wobei die meisten Gaslieferungen nach Europa gehen.

Der größte Teil des in Deutschland verbrauchten Erdgases geht in die Gebäudeheizung und in die Befeuerung von Kraftwerken. Ein kleinerer Teil kommt als Kraftstoff für Fahrzeuge oder als Chemierohstoff zur Anwendung. In der chemischen Industrie wird Erdgas vor allem energetisch genutzt. Nur ein kleinerer Teil ist für die stoffliche Nutzung von Bedeutung. Da bei der Verbrennung von Erdgas zu Heizzwecken nur eine vergleichsweise geringe Menge an CO_2 entsteht, gilt es als umweltfreundlicher Brennstoff. Günstig für technische Anwendungen ist zudem, dass sich Erdgas relativ problemlos und mit vertretbaren Kosten über Pipelines transportieren lässt. Auch für den Transport von LNG über die Weltmeere gibt es inzwischen Lösungen. Geeignete Spezialtanker transportieren das verflüssigte Gas, welches nach dem Erreichen des Bestimmungsortes wieder verdampft wird. Ungünstig dabei ist allerdings, dass allein der Transport des verflüssigten Gases mit Schiffen schon erhebliche Mengen an Energie benötigt und dass beim Transport umfangreiche sicherheitstechnische Maßnahmen erforderlich sind. In Deutschland gibt es sechs LNG-Terminals, die sich an vier Standorten befinden und die seit 2023 bereits in Betrieb bzw. noch im Bau sind.

Bezogen auf die CO_2-Bilanz wird die Nutzung von LNG als Kraftstoff kritisch gesehen. In Verbrennungsmotoren ohne Abgasbehandlungskatalysator kann in bestimmten Betriebszuständen das in LNG vorhandene Methan nicht vollständig verbrannt werden. Dadurch ist es möglich, dass Methan durch den Auspuff in die Atmosphäre gelangt. Methan besitzt eine deutlich höhere Treibhauswirkung als Kohlendioxid. Bereits relativ kleine Mengen an freigesetztem Methan tragen deshalb stärker zur Erwärmung der Atmosphäre bei als vergleichsweise große Mengen an Kohlendioxid.

In der chemischen Industrie wird Erdgas im ersten Schritt meistens zunächst in Synthesegas umgewandelt. Als Verfahren hierfür kommen vor allem das Dampfreformieren mit Wasserdampf bei Temperaturen von 850 bis 900 ^{o}C an Nickelkatalysatoren sowie die partielle Oxidation

mit Sauerstoff bei Temperaturen von bis zu 1200 °C zur Anwendung. Nach dem Abkühlen des entstandenen Synthesegases erfolgt die Weiterverarbeitung zu chemischen Produkten. Verfahren wie die Methanolsynthese, die Fischer-Tropsch-Synthese und die Hydroformylierung (Oxo-Synthese) kommen dabei zur Anwendung. Synthesegas wird zudem für die Erzeugung von Wasserstoff eingesetzt. Dabei wir das Synthesegas mittels CO-Konvertierung katalytisch mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Die beiden entstehenden Gase können in einem weiteren Prozessschritt voneinander getrennt werden. Ausgehend von Synthesegas sind über das Fischer-Tropsch-Verfahren auch langkettige wachsartige Alkane synthetisierbar, die anschließend durch mildes Hydrocracken in flüssige Kraftstoffe überführt werden können.

Beim Vergleich von Erdöl mit Erdgas wird deutlich, dass letzteres als Chemierohstoff verschiedene Vorteile aufweist, die in Zukunft voraussichtlich weiter an Bedeutung gewinnen. Dazu gehört die vergleichsweise hohe Reichweite, aber auch der hohe Gehalt an Wasserstoff. Nachteilig ist allerdings, das Methan als Hauptbestandteil des Erdgases bis heute nur begrenzt für die Synthese neuer chemischer Verbindungen einsetzbar ist, im Wesentlichen für Wasserstoff und Synthesegas und die davon abzuleitenden Produkte. Für die Umwandlung in Olefine und Aromaten, die als Basischemikalien besondere Bedeutung besitzen, gibt es bisher keine direkten großtechnischen Verfahren (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). Neue katalytische Prozesse könnten dazu beitragen, dass Direktverfahren zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten in der chemischen Industrie in großem Maßstab möglich werden. Ebenfalls von Interesse ist die direkte Umwandlung von den aus Erdgaskondensaten stammenden Alkanen Ethan, Propan und Butan zu organischen Folgeprodukten, ohne dabei den Reaktionsweg über die Olefine gehen zu müssen.

Gashydrate, auch Methanknollen genannt, gelten als wichtige Rohstoffe der Zukunft. Sie dürften aus heutiger Sicht aber eher als Rohstoffe für die Energieerzeugung als für chemische Produkte in Frage kommen. Gashydrate sind im festen Zustand vorliegende eisähnliche Gas- und Wasseraggregate. Wichtige Faktoren, die zur Bildung natürlicher Gashydrate führen sind Druck, Temperatur, ausreichende Gaskonzentration, Gaszusammensetzung und ein geeignetes Umgebungsmilieu. Bei hohem Druck, niedriger Temperatur und hoher Gaskonzentration werden Gasmoleküle in Sedimenten oder am Meeresboden eingeschlossen.

Dabei kommt es zur Bildung von aus Wassermolekülen bestehenden Molekülgittern bzw. -käfigen (Clathrate) in denen Gase aufgenommen und fixiert werden. Die eingeschlossenen Gase können aus Edelgasen, Halogenen, Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff, aber auch aus aromatischen Kohlenwasserstoffen und Alkanen bestehen. Gashydrate, die vorwiegend Methan enthalten, sogenannte Methanhydrate, könnten für die zukünftige Energieversorgung von Interesse sein.

5 Regenerative Rohstoffe

Regenerative Rohstoffe (erneuerbare Rohstoffe, nachwachsende Rohstoffe) sind natürliche Stoffe aus nachhaltigen Quellen, die durch Naturvorgänge gespeist werden und die in überschaubaren Zeiträumen erneuerbar sind. Es handelt sich bei diesen Rohstoffen um land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die nicht als Nahrungs- und Futtermittel Verwendung finden, sondern stofflich genutzt werden oder zur Erzeugung von Wärme, Strom oder Kraftstoffen zum Einsatz kommen. Regenerative Rohstoffe sind nicht mit Biomasse gleichzusetzen. Letztere umfasst die gesamte durch Pflanzen oder Tiere erzeugte organische Substanz. Sie wird von Pflanzen mit Hilfe des Sonnenlichtes aufgebaut, wobei in der Photosynthese aus CO_2 und Wasser Kohlenhydrate und weitere organische Verbindungen entstehen. Setzt man Biomasse für energetische Zwecke ein, ist zwischen regenerativen Rohstoffen (Energiepflanzen) und Reststoffen bzw. organischem Abfall zu unterscheiden.

Die aus Pflanzen und Tieren gewonnenen nachwachsenden Rohstoffe spielten in der Frühzeit der modernen Chemie eine wichtige Rolle als Ausgangsmaterialien für chemische Produkte. Verbindungen wie Ethanol, Essigsäure, Ameisensäure und Aceton wurden ausgehend von diesen Rohstoffen synthetisiert. Die aufkommende Kohle- und Erdölindustrie führte allerdings dazu, dass Rohstoffe aus pflanzlicher und tierischer Herkunft schnell an Bedeutung verloren. Heute zählen zu den regenerativen Rohstoffen schnell wachsende Baumarten und spezielle einjährige Pflanzen mit hohem Ertrag an Trockenmasse (für die Energiegewinnung) sowie zucker- und stärkehaltige Ackerfrüchte (für die Umwandlung in Biogas oder Ethanol) und Ölfrüchte (für die Gewinnung von Bioölen und Biodiesel und deren Einsatz als Schmierstoff und Treibstoff). Zudem fallen unterschiedliche organische Reststoffe in der

Land- und Forstwirtschaft, in der Industrie und im Gewerbe sowie in Haushalten an. Derartige Rest- und Abfallstoffe können je nach Herkunft und Zusammensetzung wie nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden. Die Forderung nach einem stärkeren Einsatz regenerativer Rohstoffe ist in einer Zeit abnehmender fossiler Vorräte, des Bestrebens nach verminderter Abhängigkeit von Erdöl und Erdgas sowie der Reduzierung von CO_2-Emissionen als Beitrag zum Klimaschutz notwendig und nachvollziehbar. Natürlich müssen in einem solchen Zusammenhang Kosten und Preise nachwachsender Rohstoffe, verfügbare Acker- und Waldflächen und die Konkurrenz zur Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel berücksichtigt werden. Für die Chemieindustrie relevante regenerative Rohstoffe sind Öle und Fette, Zucker und Stärke sowie „Non-Food-Biomasse".

5.1 Öle und Fette

Öle und Fette (Neutralfette, Triglyceride) sind Ester des dreiwertigen Alkohols Glycerin (Propan-1,2,3-triol) mit drei, meist verschiedenen, überwiegend geradzahligen aliphatischen Monocarbonsäuren, den Fettsäuren. Primär versteht man unter Ölen und Fetten Stoffgemische aus verschiedenen Fettsäuretriglyceriden, die aus Pflanzen (Öle) oder Tieren (Fette) gewonnen wurden. Öle und Fette gehören zu den Lipiden und dienen als Energieträger und Energiespeicher in Pflanzen, aber auch als Lösemittel für fettlösliche Vitamine und als Isoliermittel im Körper von Tieren. Während Pflanzen Öl oft in Samen oder im Fruchtfleisch speichern, wird Fett im tierischen Körper im Fettgewebe angereichert. Öle und Fette werden durch Extraktionsprozesse aus Pflanzen und Tieren gewonnen. Sie haben eine ähnliche chemische Struktur, allerdings sind Öle bei Temperaturen von 25 ^{o}C flüssig und Fette fest. Der weitaus größte Teil der produzierten Öle und Fette geht in den Bereich der Nahrungsmittel, nur ein kleinerer Teil wird in der chemischen Industrie genutzt.

Bei der Herstellung von einer Tonne Biodiesel fallen etwa 100 kg Glycerin an (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010). So produziertes Glycerin findet als Frostschutzmittel oder in Tensiden und Emulgatoren Anwendung. Viel schwieriger ist es, das Glycerin als chemischen Grundstoff für weiterführende organische Synthesen einzusetzen.

Unter den nachwachsenden Rohstoffen, deren Gesamtmenge 2017

in Deutschland bei 2,7 Millionen Tonnen lag, spielen pflanzliche Öle und tierische Fette mit über 40% die größte Rolle (vgl. Fonds der chemischen Industrie 2021). Über ein Drittel der von der Chemieindustrie verarbeiteten Öle und Fette geht in die Produktion von Tensiden, die in Wasch- und Reinigungsmitteln, Pharma- und Kosmetikprodukten sowie in Textilien Anwendung finden. Bedeutsam sind Öle und Fette auch für die Herstellung von Bioschmierstoffen und Bioölen, für Polymere und Polymeradditive sowie für Lacke und Anstrichstoffe.

Rapsöl, Rübenöl, Leinöl und Sonnenblumenöl entstammen in Deutschland heimischem Anbau. Andere Öle wie Palmöl, Palmkernöl, Sojaöl, Kokosöl und Rizinusöl müssen dagegen importiert werden. Jedes der Öle enthält unterschiedliche Fettsäuren. Die importierten Öle enthalten zum Teil Fettsäuren mittlerer Kettenlängen (vor allem Kokos- und Palmkernöle), die zur Herstellung von technischen Produkten besonders geeignet sind, z. B. für gesättigte und ungesättigte Fettalkohole. Einige Fettalkohole können je nach Kettenlänge für technische, kosmetische oder pharmazeutische Erzeugnisse Anwendung finden. Unter den technischen Applikationen befinden sich Tenside, Weichmacher und Gleitmittel. Bei den Kosmetik- und Pharmaerzeugnissen geht es um Tenside, aber auch um andere Stoffe, die Einfluss auf die Konsistenz der Produkte nehmen. Öle, die einfach und mehrfach ungesättigte langkettige Fettsäuren enthalten und die vorwiegend in der Nahrungsgüter- und Futtermittelindustrie eingesetzt werden, basieren zumeist auf Raps, Soja, Sonnenblumen, Lein oder Oliven.

Die Bedeutung von Ölen und Fetten als regenerative Rohstoffe wird unter Einbeziehung ökologischer Gesichtspunkte in Zukunft weiter zunehmen. Die Entwicklung richtet sich vor allem auf die Erhöhung der Ausbeute bei öllieferndn Pflanzen und auf die Züchtung, Optimierung und Kultivierung neuer ölhaltiger Pflanzensorten. Hierbei spielen gentechnisch optimierte Pflanzen, die möglichst auch auf kargen Standorten einen hohen Ölertrag liefern, eine wichtige Rolle. Sollte es gelingen, Pflanzen mit höherem Anteil an kurzkettigen Fettsäuren zu züchten, so wären die daraus zu gewinnenden Öle auch für die Chemieindustrie interessant.

5.2 Zucker und Stärke

Zucker und Stärke haben als nachwachsende Rohstoffe eine zunehmende Bedeutung. Zucker sind als chemische Stoffklasse eine Untergruppe der Kohlenhydrate. Man unterteilt Zucker nach der chemischen Zusammensetzung in Monosaccharide (Einfachzucker, Monosaccharose, Monose), Disaccharide (Zweifachzucker, Doppelzucker) und Oligosaccharide (Mehrfachzucker). Die größte Bedeutung unter den Zuckern hat die Saccharose, ein Disaccharid aus Glucose und Fructose. Sie wird auch Sucrose, Haushaltzucker oder Kristallzucker genannt und gilt als „Zucker" schlechthin. Wichtigste Quellen für Saccharose sind Zuckerrüben und Zuckerrohr. Stärke ist als Polysaccharid ebenfalls ein Kohlenhydrat. Sie ist einer der wichtigsten Reservestoffe in pflanzlichen Zellen. Für die industrielle Anwendung von Stärke sind sowohl deren verzweigte Form (Amylopektin) als auch die lineare Form (Amylose) von Bedeutung.

Zucker und Stärke dienen dem Menschen als Nahrungs- und Genussmittel. Sie sind wichtige Energielieferanten und -speicher im Stoffwechsel und werden mittels Photosynthese in allen grünen Pflanzen erzeugt. Unter den in Deutschland und Europa vorkommenden Pflanzen ist die Zuckerrübe der wichtigste Lieferant von Saccharose. Auch in den USA und Kanada sowie in anderen überseeischen Ländern werden Zuckerrüben zum Zweck der Gewinnung von Saccharose angebaut. Der Anbau von Zuckerrohr erfolgt vorwiegend in Ländern Südamerikas, Afrikas und Asiens, aber auch in Australien. Stärke wurde und wird in Europa zumeist aus Kartoffeln und Getreide gewonnen. Unter den Getreidearten ist vor allem Mais Hauptlieferant von Stärke.

Wichtigste Anwender von Zucker sind die Lebensmittelindustrie, die Fermentationsindustrie und die chemische Industrie. Letztere nutzt die aus Pflanzen gewonnene Saccharose und ihre Nebenprodukte als Ausgangsstoffe für chemische Synthesen und Fermentationsprozesse. Reine Saccharose wird häufig in Form von Polyetherpolyolen zur Herstellung von Polyurethanschaumstoffen eingesetzt. Sie ist aber auch Ausgangsstoff für biologisch abbaubare Tenside (Fettsäureester) und für den Süßstoff Isomalt. Anwendungen der Glucose finden sich unter anderen in Tensiden (funktionalisiert mit Fettalkoholen), in Süßstoffen (hydriert, als Sorbitol) und in Materialien für den Korrosionsschutz (in oxidierter

Form als Zuckersäure). Zucker und enzymatisch verzuckerte Stärke haben große Bedeutung für die industrielle Fermentation und bilden damit die Grundlage für die Produktion fermentativ erzeugter Produkte der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Wichtige hierbei anfallende Substanzen sind Aminosäuren, organische Säuren, Dextrane, Vitamine und vor allem Bioethanol. Fermentative Prozesse auf der Basis von Zuckern liefern für die pharmazeutische Industrie eine Reihe von biotechnologisch erzeugten Produkten wie Antibiotika, Hormone, Wachstumspräparate, therapeutische Proteine und Antikörper.

Bioethanol ist das mit Abstand großvolumigste Produkt aus biotechnologischer Herstellung. Er wird für die Anwendung als Kraftstoffkomponente ausgehend von zucker- und stärkehaltigen Pflanzenteilen in großen Mengen fermentativ produziert. Grundlage für die Herstellung von Bioethanol in Deutschland sind vor allem Getreide und Zuckerrüben. Im Fall der Verwendung von Mais und Weizen wird der Stärkeanteil zunächst in Zucker umgewandelt, um danach fermentativ zu Ethanol und Kohlendioxid umgesetzt zu werden.

Stärke und Stärkederivate werden vorwiegend bei der Herstellung von Papier und Textilien sowie bei der Lebensmittelproduktion eingesetzt. Für industrielle Applikationen ist Amylopektin im Vergleich mit Amylose von Vorteil. Das Trennen der beiden Formen der Stärke ist zwar prinzipiell möglich, erfordert aber hohen technischen und energetischen Aufwand. Daher werden Versuche mittels Gentechnik unternommen, stärkehaltige Pflanzen zu entwickeln, die vorwiegend bzw. ausschließlich Amylopektin enthalten. Durch enzymatische Behandlung lassen sich aus Stärke Cyclodextrine erzeugen, die zum Einschluss organischer Moleküle verwendet werden können. Von Bedeutung sind auch kationische und oxidierte Stärken. Durch Zugabe von Weichmachern und Copolymeren lassen sich durch Extrusion stärkehaltige Compounds erzeugen, die als biologisch abbaubare Kunststoffe Anwendung finden (Tragetüten, Agrarfolien). Stärke findet außerdem Einsatz bei der fermentativen Herstellung von chemischen Grundstoffen (Tenside, Stabilisatoren, organische Säuren), Klebstoffen und Bindemitteln.

Stärkehaltige Pflanzen bilden neben zuckerhaltigen Pflanzen eine wichtige Quelle zur Gewinnung von Glucose. Zur Herstellung von Glucose wird in diesem Fall die aus den Körnern stammende Stärke mittels enzymatischer Verfahren vollständig hydrolysiert.

Entwicklungsbedarf beim Einsatz von zucker- und stärkehaltigen

Rohstoffen in der chemischen Industrie besteht vor allem in der Verbesserung der Fermentationsverfahren durch molekularbiologische Arbeiten in der Stammentwicklung. Damit können neue Synthesewege erschlossen und Ausbeuten erhöht werden. Außerdem besteht Potenzial bei der Entwicklung verbesserter Enzymkatalysatoren sowie in den Bereichen Prozesssteuerung und Aufbereitung. Ziel muss es sein, dass die industrielle biotechnologische Produktion ähnlich wirtschaftlich ist, wie chemische Prozesse auf Basis fossiler Rohstoffe.

Neben Zucker und Stärke erlangt auch Lignocellulose als nachwachsender Rohstoff immer stärkere Bedeutung. Lignocellulose, die aus den beiden Bestandteilen Cellulose und Lignin aufgebaut ist, bildet die Zellwand verholzter Pflanzen und hat damit eine wichtige Stabilisierungsfunktion. Die Verwendung von Lignocellulose findet vorwiegend in Form von Holz als Baustoff und als Energielieferant statt. Der enthaltene Celluloseanteil wird bei der Herstellung von Papier verwendet (Lignin ist hierbei Abfallstoff). Lignocellulose kann grundsätzlich aber auch zur Herstellung chemischer Grundstoffe dienen. Vor allem die phenylartigen Verbindungen im Lignin sind dabei interessant. Lignocellulose wird schon heute für die Herstellung von Biokraftstoffen eingesetzt. Wichtiges Produkt dabei ist Lignocellulose-Ethanol, welcher über den Cellulose-Ethanol-Prozess hergestellt wird. Zur Produktion von Lignocellulose-Ethanol müssen zunächst die Cellulose und die ebenfalls vorliegenden Hemicellulosen in die einzelnen Zucker gespalten werden. Hierzu werden Säuren und spezielle Enzyme eingesetzt. Anschließend müssen Hefen das Gemisch aus Glucose und weiteren Kohlenhydraten zu Ethanol fermentieren.

5.3 „Non-Food-Biomasse“

Unter dem Begriff „Non-Food-Biomasse“ werden Holz, Reststoffe aus der Agrar- und Forstwirtschaft (z. B. Stroh) Reststoffe aus der Nahrungs- und Genussmittelindustrie sowie Gras zusammengefasst. Die energieerzeugende Industrie, aber auch die chemische Industrie, steht beim Einsatz dieser Stoffe nicht in direkter Konkurrenz zur Nahrungs- und Genussmittelindustrie. Allerdings geht es bei der Nutzung der auf der Erde vorhandenen Flächen immer auch um die Debatte „Nahrung oder Energie?“. Kritisch wird diese Frage dann, wenn sich Menschen Grund-

nahrungsmittel nicht mehr leisten können, während die umweltbewussten Europäer und Nordamerikaner Biokraftstoffe tanken. Grundsätzlich können für die „Non-Food-Biomasse“ Flächen genutzt werden, die für den Anbau von Feldfrüchten nicht geeignet sind. Bei der Erzeugung und Nutzung von „Non-Food-Biomasse“ spielen wirtschaftliche und umweltschonende Aspekte eine wichtige Rolle. Damit verbunden sind die Züchtung geeigneter Pflanzen sowie Verbesserungen bei den Anbauverfahren, bei der Logistik und bei der Aufarbeitung pflanzlicher Rohstoffe. Neue Ansätze sind auch bei der Weiterverarbeitung in Bioraffinerien und Vergasungsanlagen gefragt.

Entscheidend für die Herstellung von chemischen Produkten und Kraftstoffen aus Biomasse sind technologisch auf hohem Niveau arbeitende Bioraffinerien. Verfügbarkeit, Qualität und Preis der Biomasse bestimmen die industrielle Nutzung dieses Rohstoffs sowie die Auswahl des Raffinerie-Verfahrens. Eine besonders wichtige Rolle beim Einsatz von „Non-Food-Biomasse“ spielt Lignocellulose. In LCF-Bioraffinerien (Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerien) wird die Biomasse in Cellulose, Hemicellulose, Lignin und verschiedene Extrakte getrennt. Mittels chemischer und enzymatischer Aufschlussverfahren werden Zucker, Öle, Fette und Ligninderivate erzeugt. Anschließend können aus diesen Stoffen durch Fermentation Chemikalien wie Ethanol und Milchsäure, aber auch Polymere wie Polyhydroxybutyrate synthetisiert werden. Reststoffe können durch Vergasung und Fischer-Tropsch-Synthese in Biodiesel und Chemierohstoffe sowie durch Vergärung in Biogas umgewandelt werden. Bei der Verwendung von feuchter Biomasse gibt es zusätzlich die Möglichkeit, aminosäure- und proteinhaltige Produkte abzutrennen.

Lignocellulose findet in großem Maßstab in der Zellstoffherstellung Anwendung. Der hierbei produzierte Zellstoff besteht vor allem aus Cellulose sowie aus Hemicellulosen und geringen Ligninanteilen. Die Ablauge des Zellstoffprozesses (Schwarzlauge, Black Liquor) enthält im Wesentlichen Lignin und Anteile von Hemicellulosen sowie Abbauprodukte (z. B. Essigsäure, Methanol, Furfural). Letztere sind für die Chemieindustrie grundsätzlich interessant. Allerdings ist die Abtrennung und Weiternutzung oft mit erhöhtem Aufwand verbunden.

Bei der erweiterten Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie spielt die Anknüpfung der Aufarbeitungsprozesse an die bereits seit Jahrzehnten etablierten Verfahren der Petrochemie eine wichtige

Rolle. Verschiedene bei der Aufarbeitung von Biomasse anfallende Zwischenprodukte können damit wirtschaftlich und mit dem vorhandenen technologisch-petrochemischen Knowhow weiterverarbeitet werden.

Nachteile der Nutzung von „Non-Food-Biomasse" sind die vergleichsweise niedrige Energiedichte und lange Transportwege. Daraus resultieren hohe Logistik- und Transportkosten. Deshalb wird an effektiven neuen Lösungen gearbeitet. Das vom Karlsruher Institut für Technologie entwickelte bioliq-Verfahren kann genutzt werden, um aus trockener Biomasse synthetische Kraftstoffe und Basischemikalien herzustellen (vgl. Karlsruher Institut für Technologie 2022). Die Entwicklung zielt vor allem auf die Nutzung von relativ preisgünstiger, bisher nicht genutzter Restbiomasse ab. Dabei werden durch dezentrale Schnellpyrolyse von Biomasse zu energiereichem Biosyncrude sowie nachfolgende zentrale Umwandlung zu Synthesegas und Veredlung zu den gewünschten chemischen Produkten im industriellen Maßstab teure Transportwege reduziert. Die Energiedichte des Biosyncrude ist bezogen auf das Volumen von trockenem Stroh um mehr als eine Größenordnung höher. Dadurch trägt die dezentrale Energieverdichtung zur Wirtschaftlichkeit des Prozesses bei. Das Verfahren liefert gleichzeitig auch Wärme und Strom, womit ein großer Teil der Prozessenergie abgedeckt wird. Damit ergibt sich eine günstige CO_2-Bilanz für den Gesamtprozess. Insgesamt kann die eingesetzte Biomasse sowohl stofflich als auch energetisch vollständig verwertet und genutzt werden.

Bedeutsam für die Raffination von lignocellulosehaltiger Biomasse und für die umfängliche Stoffumwandlung in verwertbare Chemieprodukte ist die Weiterentwicklung von Katalysatoren sowie die fortgesetzte Suche nach geeigneten Enzymen, Hefen und Mikroorganismen. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung bei der Aufarbeitung von Biomasse besteht darin, die Hemicellulosen mit ihrem vergleichsweise niedrigen Polymerisationsgrad zu pfropfen bzw, querzuvernetzen und auf diesem Weg Biokunststoffe zu synthetiseren (vgl. GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI 2010).

Bibliographie

Bartels, Henning (2020): Wasserstoff statt Kohle: Wie wird Stahl grün? Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), (16.03.2020).

www.bdew.de/verband/magazin-2050/wasserstoff-statt-kohle-der-stahl-der-zukunft-ist-klimafreundlich.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2020): Energiestudie 2019, Stand 30.04.2020. www.bgr.bund.de.

Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (2023): Erdgasreserven und Potenziale in Deutschland (26.04.2023). www.bveg.de/die-branche/erdgas-und-erdoel-in-deutschland/ erdgasreserven-in-deutschland.

Fonds der chemischen Industrie (2021): Nachwachsende Rohstoffe. Informationsserie (25.01.2021). www.vci.de/fonds/presse-und-infos/publikationen.

GDCh-DECHEMA-DGMK-VCI (2010): Rohstoffbasis im Wandel. Positionspapier der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK) und des Verbands der Chemischen Industrie e.V. (VCI). Frankfurt/Main Januar 2010.

Karlsruher Institut für Technologie (2022): Der bioliq®-Prozess. www.bioliq.de.

Statista (2022): Erdölverbrauch weltweit bis 2022. www.de.statista.com.

Statista (2023): Erdgasverbrauch in Deutschland in den Jahren von 1980 bis 2022. www.de.statista.com.

Süddeutsche Zeitung (2023): Steinkohle – Importe meist aus Russland (26.02.2023). www.sueddeutsche.de/wirtschaft/steinkohle-importe-meist-aus-russland.

thyssenkrupp Steel (2023): thyssenkrupp Steel vergibt Milliardenauftrag für Direktreduktionsanlage an SMS group: Start eines der weltweit größten industriellen Dekarbonisierungsprojekte (01.03.2023). www.thyssenkrupp-steel.com.

Zeit Online (2022): Kohlekraftwerke aus Reserve dürfen weiteres Jahr am Netz bleiben (28.09.2023). www.zeit.de/wirtschaft/2022-09/kohlekraftwerke-verlaengerung-bundesregierung-gas-energiekrise?

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *159 (2023), 127–131*

Verzeichnis der Autorinnen und Autoren

Benjamin Busch (*1987) ist Assistent am Lehrstuhl für Strukturgeologie und Tektonik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seine Interessen sind die Analyse und Vorhersage von Reservoir-Qualitäten im tiefen Untergrund, Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen und Analysen der Rohstoffverfügbarkeiten im Kontext geopolitischer Veränderungen. Nach dem Studium der Angewandten Geowissenschaften an der RWTH Aachen (Schwerpunkt „Energie- und mineralische Rohstoffe") promovierte er am KIT, mit anschließenden Forschungsaufenthalten in den USA und Japan. Er ist Mitglied verschiedener professioneller und interdisziplinärer Vereinigungen, wie der European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE) und der deutschen wissenschaftlichen Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe (DGMK e.V.).

benjamin.busch@kit.edu

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 Lomonossow-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 6 Monographien, Herausgeberin von 24 Sammelbänden und 380 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

Christoph Hilgers (*1968) leitet den Lehrstuhl für Strukturgeologie und Tektonik und ist geschäftsführender Direktor des Instituts für Angewandte Geowissenschaften 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 RWTH Aachen und der Angewandten Strukturgeologie & Gesteinsmechanik am Imperial College London arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent an der RWTH Aachen, von wo aus er an das Werkzeugmaschinenlabor (WZL), Qualitätsmanagement & Fertigungsmesstechnik wechselte. Dort entwickelte er die GUtech Oman 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 Aachen. Er ist Mitglied verschiedener professioneller und interdisziplinärer Initiativen wie dem ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien, RohstoffWissen e.V. und der wissenschaftlichen Gesellschaft für die Up- und Downstream Industrie DGMK e.V.

christoph.hilgers@kit.edu

Jochen Kolb (*1969) ist Professor für Geochemie und Lagerstättenkunde im Institut für Angewandte Geowissenschaften am KIT. Darüber hinaus ist er Studiendekan für 7 geowissenschaftliche Studiengänge am KIT. 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. Nach dem Studium der Geologie und Paläontologie an der Johann Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt am Main wechselte er für die Promotion und eine wissenschaftliche Assistenz an die RWTH Aachen, wo er auch 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 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

Axel Müller (*1970 / MLS) ist Leiter der Forschungsgruppe Mineralogie 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 (NHM). 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 promoviert derzeit am Lehrstuhl Strukturgeologie und Tektonik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zuvor studierte sie Angewandte Geowissenschaften an der Technischen Universität Darmstadt. Ihre Interessen sind die Charakterisierung von Reservoireigenschaften, Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen, Diagenese, Petrographie und Petrophysik, sowie Entwicklungen im Bereich der kritischen und strategischen Rohstoffversorgung. Sie ist Mitglied in der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologischen Vereinigung, der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, sowie der Mineralogical Society of America.

jasemin.oelmuz@kit.edu

Gerhard Pfaff (*1953 / MLS) studierte von 1973 bis1978 Chemie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und promovierte dort 1983 mit einer Arbeit im Bereich der Anorganischen Festkörperchemie. Anschließend war er als wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent am Fachbereich Chemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena 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 in-

nerhalb der Forschung für Effektpigmente. 2006 übernahm er die Leitung der Pigmentforschung. Seit 1994 hält er Vorlesungen an der TU Darmstadt, wo er sich 1997 am dortigen Fachbereich Chemie mit einer Arbeit über Erdalkalititanate und Eisenoxide habilitierte. 2008 wurde er zum apl. Professor an der TU Darmstadt ernannt. Er ist Autor von mehr als 150 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

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät
Band 144 (2020)

Gerhard Pfaff, Reinhard O. Greiling & Roland Pail (Hg.)

Klimawandel – Anzeichen, Ursachen, Folgen. Kolloquium der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin am 13.2.2020 in der Humboldt-Universität Berlin
2020, 155 S., ISBN 978-3-86464-181-7, 17,80 EUR

Ausführliche Informationen unter:
http://www.trafoberlin.de/978-3-86464-181-7.html

Der Klimawandel stellt mit Sicherheit eine der brennendsten Herausforderungen der Menschheit dar. Dabei wird insbesondere die Frage nach dem Beitrag des Menschen an der raschen globalen Erwärmung des Weltklimas auf internationaler Ebene so leidenschaftlich wie kontrovers diskutiert. Mit dem Kolloquium *Klimawandel – Anzeichen, Ursachen, Folgen* hat sich die Leibniz-Sozietät zum Ziel gesetzt, diese gesellschaftlich höchst relevante Frage kritisch, wissenschaftlich fundiert und vor allen aus dem Blickwinkel unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen zu erörtern. In sieben Vorträgen wurden schlaglichtartig zentrale Elemente des Themenkomplexes Weltklima adressiert. Vier Vorträge standen unter dem Thema „Beobachtungen und globale Modelle“ und erörterten die Frage, mit welcher Zuverlässigkeit Informationen über Klimaentwicklungen der Vergangenheit und der Gegenwart erfasst und diese konsistent in eine Modellbildung integriert werden können (Beiträge von Reinhard O. Greiling, Roland Pail, Rainer Feistel und Olaf Hellmuth, Hennes Obermeyer). Die verbleibenden drei Präsentationen standen unter dem Thema „Klimaindikatoren in Subsystemen“ und beleuchteten potentielle Klimasignale in Ozeanen, Eisregionen und im alpinen Raum (Beiträge von Stefan Rahmstorf, Klaus Dethloff, Michael Krautblatter). In diesem Tagungsband ist ein repräsentativer Querschnitt dieser Beiträge gesammelt. Er soll dazu beitragen, die angeregte, vielschichtige und tiefgründige Diskussion, die während des Kolloquiums stattgefunden hat, in eine noch größere Öffentlichkeit zu tragen.

Bestellung über jede gute Buchhandlung oder direkt beim Verlag:
trafo Verlagsgruppe, Finkenstraße 8, 12621 Berlin
Mail: info@trafoberlin.de Tel.: 030/612 99 418
http://www.trafoberlin.de/reihe_leibniz.html

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät
Band 145 (2020)

Horst Kant & Gerhard Pfaff (Hg.)
Von den Mühen der Ebenen und der Berge in den Wissenschaften. Kolloquium zu Ehren von Hans-Otto Dill, Peter Knoll, Hubert Laitko und Dietmar Linke am 10.09.2020
2020, 186 S., ISBN 978-3-86464-182-4, 19,80 EUR

Ausführliche Informationen unter:
http://www.trafoberlin.de/978-3-86464-182-4.html

Am 10. September 2020 fand ein Kolloquium zu Ehren von vier verdienstvollen Kollegen der Leibniz-Sozietät statt. In seiner Einführung zum Ehrenkolloquium „Einsichten und Ansichten“ ging Vizepräsident Lutz-Günther Fleischer auf die außergewöhnlichen Lebensleistungen der vier mit dem Kolloquium geehrten Mitglieder der Leibniz-Sozietät ein. Die anschließenden Festvorträge orientierten sich an den Forschungsfeldern der Geehrten und umfassten entsprechend eine große thematische Breite. Der *Peter Knoll* gewidmete Fachvortrag „Grubengasproduktion und -verwertung im Saarland vor dem Hintergrund der Energiewende“ wurde von Hans-Jürgen Kaltwang gehalten. Der Referent ging dabei auf die Besonderheiten bei der Produktion von Grubengas im Saarland und dessen Verwertung unter sich verändernden Anforderungen durch die Energiewende ein. Der *Dietmar Linke* gewidmete Fachvortrag von Elena Blokhina trug den Titel „150-jähriges Jubiläum des Periodensystems der Elemente“. Die Referentin ging ausführlich auf die Leistungen von Julius Lothar Meyer und Dmitri Iwanowitsch Mendelejew sowie anderer Naturwissenschaftler ein, die im Jahre 1869 zur ersten Formulierung des Periodensystems der Elemente führten. Der Fachvortrag für *Hans-Otto Dill* wurde von Hartmut Hecht gehalten. Das Thema des Beitrags lautete „Aufklärung am Polarkreis: Die Lappland-Expedition des Pierre Louis Moreau de Maupertuis“. Der vierte auf dem Kolloquium an diesem Tage geehrte Kollege war Hubert Laitko. Den Fachvortrag für *Hubert Laitko* hielt Annette Vogt: Das Thema ihres Vortrages lautete „Emil J. Gumbel (1891–1966) – Mathematiker, Pazifist und politischer Autor“. Der Mathematiker und Statistiker E. J. Gumbel arbeitete seit seiner Vertreibung 1932/33 im Exil besonders zur Extremwertstatistik, war aber auch ein politischer Aktivist und Pazifist, Redner und Autor politischer Bücher und Artikel, darunter in der berühmten Wochenschrift „Die Weltbühne“.

Bestellung über jede gute Buchhandlung oder direkt beim Verlag:
trafo Verlagsgruppe, Finkenstraße 8, 12621 Berlin
Mail: info@trafoberlin.de Tel.: 030/612 99 418
http://www.trafoberlin.de/reihe_leibniz.html

Veröffentlichungen der Leibniz-Sozietät zum Themenkreis Rohstoffe und Energie in der tra*f*o Verlagsgruppe, 2011–2022

Abhandlungen der Leibniz-Sozietät

Band 47
Banse, Gerhard / Fleischer, Lutz-Günther (Hg.): „Energiewende 2.0 im Fokus. – Bewährtes, Problematisches, Notwendiges, Kontroverses“, 2018, 339 S., zahlr. Tab. und Abb., ISBN 978-3-86464-125-1, 42,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-125-1.html

Band 31
Banse, Gerhard u.a. (Hg.): „Energiewende – Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag“, 2013, 315 S., zahlr., Tab. u. Abb., ISBN 978-3-86464-006-3, 36,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-006-3.html

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät

Band 155 (2022)
„Energiewende 2.0. Im Focus: Die Infrastruktur“.
2022, 101 S., ISBN 978-3-86464-231-9, 14,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-231-9.html

Band 147 (2021)
„Kolloquium und Expertendiskurs: Die Energiewende 2.0: Im Fokus: die MOBILITÄT“.
2021, 140 S., ISBN 978-3-86464-224-1, 15,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-224-1.html

Band 130 (2017)
„Symposium ‚Technologie und nachhaltige Entwicklung‘“
Mit den Beiträgen: Nachhaltigkeitsaspekte einer zukunftssicheren Energieversorgung von Städten und Gemeinden / Nachhaltigkeit von Kunststoffverpackungen – von der Wiege bis zur Bahre / Die Rolle der Nachhaltigkeit in der Konsumgüterproduktion, ihre Einschätzung und Kommunikation am Beispiel der Verpackungstechnik / Technologische Herausforderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung / Perspektiven und Probleme einer kohlenstofffreien Energiewirtschaft / u.a.m.
2017, 180 S., zahlr. Tab. u. Abb., ISBN 978-3-86464-136-7, 19,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-136-7.html

Band 122 (2015)
„Technologiewandel in der Wissensgesellschaft – qualitative und quantitative Veränderungen“
Mit den Beiträgen: Energietechnik und Energiewende / Entwicklungstendenzen in der Wärmeversorgung / Über einige qualitative und quantitative Fortschritte der praktischen Nutzung von Nanotechnologie bei der Energieumwandlung / u.a.m.
2015, 200 S., ISBN 978-3-86464-092-6, 19,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-092-6.html

Band 120 (2014)
„Kolloquium: Im Mittelpunkt steht der Mensch – Fortschritte in den Geo-, Montan-, Umwelt-, Weltraum- und Astrowissenschaften am 11. April 2014 in Berlin“
Mit dem Beiträgen: Mögliche klimatische Folgen bei weltweitem Einsatz erneuerbarer Energie / Verfügbarkeit von Rohstoffen in Deutschland – Argumente für eine stärkere Nutzung eigener Rohstoffressourcen / Ist das Erschließen von Geothermie-Lagerstätten im mittleren Oberrheingraben wirklich eine gute Idee? / u.a.m.
2014, 227 S., ISBN 978-3-86464-090-2, 19,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-86464-090-2.html

Band 112 (2011)
Ambivalenzen von Technologien – Chancen, Gefahren, Missbrauch
Mit den Beiträgen: Risiken und Chancen der Renaissance „vergessener“ Technologien (am Beispiel fossiler Kohlenstoffträger) / Ambivalenzen und Komplexität stoffwandelnder Technologien / Ambivalenzen in der Uranwirtschaft – Segen oder Fluch für die Menschheit? / Ambivalenzen der Kunststofftechnologie – Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts /Ambivalenzen erneuerbarer Energien / u.a.m.
2011, 184 S., ISBN 978-3-89626-982-9, 19,80 EUR
Titel-Infos: www.trafoberlin.de/978-3-89626-982-9.html

Bestellungen über jede gute Buchhandlung oder direkt beim Verlag
trafo Wissenschaftsverlag, Finkenstraße 8, 12621 Berlin
Tel.: 030/612 99 418 e-Mail: info@trafoberlin.de