

SITZUNGSBERICHTE

LEIBNIZ-SOZietät DER WISSENSCHAFTEN

Rohstoffe und Energiebereitstellung: Innovative Ansätze und Strategien für eine gesicherte und zukunftsfähige Energieversorgung

Kolloquium der Leibniz-Sozietät der
Wissenschaften am 18. März 2026

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

Mit Beiträgen von Carlo Burkhardt, Reinhard O. Greiling,
Sebastian Hasenstab-Riedel, Christoph Hilgers, Ernst-Peter Jeremias,
Christina Labusch, Norbert Mertzsch, Wolfgang Methling,
Axel Müller, Jasemin A. Ölmez, Gerhard Pfaff,
Axel A. O. Wenke, Melike Yildirim Ayyildiz



BAND 171

JAHRGANG 2026

LEIBNIZ-SOZietÄT: SITZUNGSBERICHTE

SITZUNGSBERICHTE
BAND 171 JAHRGANG 2026



LEIBNIZ-SOZIETÄT DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Impressum

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

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

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

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

Briefanschrift der Redaktion:

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

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

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

Dr. Wolfgang Weist, Finkenstr. 8, 12621 Berlin

Telefon: 0173 675 12 19

e-mail: info@trafoberlin.de

Die Reihe „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ erscheint in
unregelmäßigen Abständen online unter
<https://leibnizsozietat.de/publikationen/sitzungsberichte/>.

Redaktionelle Durchsicht dieses Bandes: Redaktionskollegium der Leibniz-
Sozietät Redaktionsschluss: 24.09.2026

DOI: 10.53201/SITZUNGSBERICHTE171

ISSN 0947-5850 ISBN 978-3-86464-305-7

Inhalt

Reinhard O. Greiling, Christoph Hilgers, Axel Müller, Gerhard Pfaff Vorwort	7
Wolfgang Methling Rede zur Eröffnung 5. Rohstoffkolloquium der Leibniz- Sozietät	17
Christoph Hilgers, Melike Yildirim Ayyildiz, Jasemin A. Ölmez Rohstoff- und Energiebereitstellung: Strategien im geopolitischen Kontext	19
Christina Labusch Energetische Verwertung als Baustein einer nachhaltigen Abfallwirtschaft	43
Axel A. O. Wenke, Johannes Böcker, Christoph Boermann, Matthias Berling, Matthias Determann, Volker Köhler, Katja Krause, Jakub Kokinda, Silvio Lehmann, Thomas Mozer, Bianca D. Neumann, Folker Ruhe, Joachim Sluet, Dominik Soyk, Kerstin Todte, Maximilian Zindel Altmark Lithium Extraktion – Neuentwicklung einer lithiumhaltigen Solelagerstätte im Altmark-Gasfeld, Sachsen-Anhalt, Deutschland	55
Sebastian Hasenstab-Riedel Reaktiv-ionische Flüssigkeiten für eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen	69
Ernst-Peter Jeremias, Norbert Mertzsch, Gerhard Pfaff Energie- und Mobilitätswende als Rohstoffwende: Warum eine reine 1:1-BEV-Elektrifizierung nicht ausreicht und Batterierecycling zur Systembedingung wird	85

Melike Yildirim Ayyildiz, Jasemin A. Ölmez, Christoph Hilgers Rare Earths and European Supply Resilience: Lessons from Project Development Timelines and International Strategies	103
Carlo Burkhardt Recycling von Seltene-Erden-Magneten des Nd-Fe-B-Typs: Herausforderungen und Lösungen	121
Axel Müller Vom Quarz zum Solarmodul: Momentane Herausforderungen und Zukunftsperspektiven der europäischen Silizium-Wertschöpfungskette	137
Axel Müller Belebung der Uranwirtschaft	157
Verzeichnis der Autorinnen und Autoren	185

Vorwort

***Reinhard O. Greiling, Christoph Hilgers, Axel Müller,
Gerhard Pfaff***

(Karlsruhe, MLS; Karlsruhe, MLS; Oslo, MLS; Berlin, MLS)

Am 18. März 2026 veranstaltete die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin ihr 5. Rohstoffkolloquium. Thema in diesem Jahr war *Rohstoffe und Energiebereitstellung: Innovative Ansätze und Strategien für eine gesicherte und zukunftsfähige Energieversorgung*. Das Kolloquium stellte die Fortsetzung der in den Jahren 2022 bis 2025 durchgeführten Veranstaltungen *Kritische Rohstoffe, Gewinnung bis Entsorgung: Die Geowissenschaften als Problemlöser* (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 154/2022), *Kritische Rohstoffe: Auswirkungen wachsender geo- und klimapolitischer Herausforderungen auf die Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas* (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 159/2023), *Kritische Rohstoffe – große Bedeutung und geringes öffentliches Bewusstsein – was ist zu tun?* (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 163/2024) und *Das neue europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen – The Critical Raw Materials Act: Herausforderungen und Maßnahmen* (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 166/2025) dar. Das Kolloquium wurde gemeinsam von den beiden Arbeitskreisen der Leibniz-Sozietät GeoMUWA (Geo-, Montan-, Umwelt-, Astrowissenschaften) sowie Energie, Mensch und Zivilisation durchgeführt. Der vorliegende Band 171 der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin vereint die Beiträge dieses Kolloquiums in schriftlicher Form und stellt diese damit interessierten Leserinnen und Lesern zur Verfügung.

Das 5. Rohstoffkolloquium thematisierte die wachsenden Herausforderungen im Bereich der Rohstoffbereitstellung für die Energieversorgung, die nach innovativen Lösungen verlangen, um eine gesicherte und zukunftsfähige Energieversorgung zu gewährleisten. Dieses Kolloquium widmete sich der Analyse aktueller Strategien und der Entwicklung neuer Konzepte zur effektiven Erkundung und Nutzung von Energierohstoffen sowie von Rohstoffen, die für die Herstellung energieproduzierender

Systeme erforderlich sind. Experten aus Wissenschaft, Industrie und Politik waren eingeladen, ihre Perspektiven zu teilen und neue Lösungswege aufzuzeigen. Eines der Ziele des Kolloquiums war es, eine interdisziplinäre Plattform für den Austausch von Ideen und die Förderung kooperativer Projekte zu schaffen, die Synergien zwischen den verschiedenen Akteuren unterstützen, um gemeinsam Lösungen zu entwickeln, die den aktuellen Herausforderungen im Bereich der Energierohstoffe und Energieerzeugung gerecht werden.

Im CEDIO Konferenzzentrum Berlin (Storkower Bogen) begrüßte der Vizepräsident der Leibniz-Sozietät *Wolfgang Methling* die Anwesenden des Kolloquiums, die in Präsenz und per Zoomübertragung teilnahmen. In seiner Eröffnung verwies *Wolfgang Methling* auf den engen Zusammenhang der Themen „Rohstoffe“ und „Energie“, die im Kolloquium mit 10 Vorträgen behandelt werden sollten. Er stellte fest, dass Rohstoffe, darunter kritische Rohstoffe, essentiell für eine sichere, nachhaltige und zukunftsfähige Energieversorgung in Deutschland und der Welt sind und dass die Leibniz-Sozietät durch ihre Expertise und ihre interdisziplinäre Forschung einen Beitrag zu den notwendigen Veränderungsprozessen auf diesem Gebiet leisten kann.

Den ersten Fachvortrag des Kolloquiums mit dem Titel *Rohstoff- und Energiebereitstellung – Strategien im geopolitischen Kontext* hielt *Christoph Hilgers* (MLS, *Melike Yildirim Ayyıldız* und *Jasemin A. Ölmez*, alle Karlsruher Institut für Technologie). In seinen Ausführungen verwies er darauf, dass der Energie- und Rohstoffbedarf Deutschlands, der drittgrößten Wirtschaftsnation der Welt, auch in Zukunft nur durch Importe gedeckt werden kann, zu der ressourceneffiziente Kreislaufsysteme beitragen können. Soziale, technologische, ökonomische, ökologische, legale, (geo)politische, ethische und geologische Faktoren (kurz STEEL-PEG) stellen jedoch im internationalen Wettbewerb zunehmend größere Anforderungen an resiliente Lieferketten. Das bislang nicht gelöste deutsche Trilemma bezahlbarer, verlässlicher und umweltverträglicher Energieversorgung und die zunehmend ausgelagerte Rohstoff- und Materialversorgung stellen energie- und materialintensive (und gleichzeitig strategische) Branchen aufgrund hoher Kosten und Lieferengpässen vor Herausforderungen. An ausgewählten Beispielen zeigte der Vortrag auf, wie Lieferketten durch Import- und Marktkonzentrationen, durch Geopolitik mit Handelskonflikten, politischen Instabilitäten und Kriegen, durch Handelspolitik mit Zöllen, Handelsbeschränkungen oder Handelsabkommen sowie durch Unfälle, Naturkatastrophen oder Streiks

disruptiv beeinträchtigt werden. *Christoph Hilgers* stellte in seinen Ausführungen abschließend fest, dass Versorgungssicherheit durch Agilität, Anpassungsfähigkeit und Abstimmung der Stakeholder dann robust und nachhaltig gestaltet werden kann, wenn strategische Rohstoffe und strategische Branchen nicht nur hinsichtlich gesellschaftspolitischer Planziele, sondern auch bei disruptiven Ereignissen resilient bleiben.

Christina Labusch (REMONDIS) stellte eingangs ihres Vortrags *Thermische Verwertung als Baustein einer nachhaltigen Abfallwirtschaft* zunächst dar, dass die EU-Abfallrahmenrichtlinie und das Kreislaufwirtschaftsgesetz die Abfallhierarchie festlegen. Dementsprechend sind zunächst Abfälle zu vermeiden, Ressourcen wiederzuverwenden, bevor sie vor allem stofflich recycelt und (energetisch) verwertet werden. Im unteren Ende der Abfallhierarchie ist schließlich die Beseitigung angesiedelt. Seit 2005 besteht in Deutschland im Unterschied zu anderen europäischen Ländern ein Deponierungsverbot für heizwertreiche Abfälle. Um deren Deponierung zu verhindern, rückte in den vergangenen 20 Jahren zunehmend die energetische Verwertung von Abfällen in den Fokus einer nachhaltigen Abfallwirtschaft. REMONDIS betreibt weltweit unter anderem 21 thermische Abfallbehandlungsanlagen sowie 10 Ersatzbrennstoffproduktionsanlagen. Der Vortrag gab einen Einblick in die energetische Verwertung von Abfällen bei REMONDIS und zeigte, wie wertvolle Ressourcen geschont werden, weil Reststoffe oft nicht mehr stofflich recycelt werden können. An ausgewählten Beispielen wurden die Erzeugung von Fernwärme und Strom für Kommunen und Haushalte sowie die Bedeutung für die Dekarbonisierung des Wärmenetzes bis 2045 beleuchtet. In einem weiteren Teil des Vortrags ging *Christina Labusch* auf die Abtrennung von Metallen für das Recycling in thermischen Abfallbehandlungsanlagen, den Einsatz von stabilisierten Schlacken als Recyclingbaustoffe und auf die Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Kreislauf ein. Die starke Verringerung der Deponierung von Siedlungsabfällen in Deutschland ist das Ergebnis eines konsequenten Zusammenspiels von Recycling, Vorbehandlung und thermischer Verwertung.

Axel A. O. Wenke (Neptune Energy Berlin) führte in seinem Vortrag *Altmark Lithium Extraction: Project ALE* aus, dass dieses Projekt das Altmark-Gasfeld in Sachsen-Anhalt, Deutschland, für die Gewinnung von Lithium aus geothermischen Solen nutzt. Das Altmark-Feld ist das zweitgrößte Onshore-Gasfeld innerhalb der EU mit einer kumulierten Förderung von mehr als 213 Mrd. Sm³ seit 1969. Reservoir ist das permische Rotliegend, welches neben Gas auch Solen mit erhöhten

Lithiumgehalten enthält. Nach Jahrzehnten der Erdgasförderung wird nun die Sole als untertägige Ressourcenbasis für eine heimische Lithiumversorgung neu entwickelt. Die mittlere Lithiumkonzentration in der Sole unterhalb des Gas-Wasser-Kontakts liegt im Mittel bei 440 mg/l, lokal bis 640 mg/l. Ein erster Anlauf zur Erschließung der Lithiumressource in der Altmark erfolgte bereits in den 1980er-Jahren, wurde jedoch kurz vor Inbetriebnahme einer ersten Demonstrationsanlage aus wirtschaftlichen und politischen Gründen eingestellt. Die systematische Neuentwicklung des Feldes begann 2022. 2024 erhielt das Projekt das erste bergbaurechtliche Bewilligungsfeld zur Förderung von Lithium aus Solen in Deutschland, die Bewilligung Jeetze-L. Das Projekt verfolgt eine phasenweise Entwicklungsstrategie, die auf bestehenden Bohrungen, Infrastrukturen und Untergrundkenntnissen aufbaut und neue Erkundungs- und Erschließungsaktivitäten sowie den Einsatz von direkter Lithium Extraktion (Direct Lithium Extraction, DLE) kombiniert. Mehrere Pilotanlagen vor Ort haben bereits die Herstellung von batteriegeeignetem Lithiumcarbonat demonstriert. Eine Demonstrationsanlage im größeren Maßstab ist für 2028 geplant, die kommerzielle Produktion soll 2030 beginnen. Gegenwärtig ist im Endausbau eine Produktion von ca. 24.000 t LCE (Lithium Carbonate Equivalent) geplant, die Größe der Ressource lässt jedoch eine deutlich höhere Skalierung zu. Neben den geologischen und extraktionstechnischen Herausforderungen wird es wichtig sein, den Aufbau einer Wertschöpfungskette in der Postextraktion unterstützend mit aufzubauen, um eine regional naheliegende Abnahme zu gewährleisten. Hier bietet der nord- bis mitteldeutsche Raum hervorragende Bedingungen, speziell an den Chemieparksstandorten Bitterfeld-Wolfen und Lausitz, bei Batterie- und Autoproduzenten in Brandenburg und Niedersachsen, sowie Chemikalienvertrieben im Hamburger Raum. Für die Region ist das Projekt ALE eine große Möglichkeit für eine zukünftige Wertschöpfung mit neuen Arbeitsplätzen im nachhaltigen Sektor.

Der Vortrag von *Sebastian Hasenstab-Riedel* (Freie Universität Berlin) zum Thema *Reaktiv-ionische Flüssigkeiten für eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen* verwies in seinen Ausführungen darauf, dass die immer wichtiger werdende nachhaltige Nutzung von Ressourcen innovative chemische Ansätze erfordert, die eine hohe Reaktivität, Sicherheit und Energieeffizienz miteinander verbinden. Reaktiv-ionische Flüssigkeiten (Reactive Ionic Liquids, RILs) stellen eine neuartige und vielseitige Stoffklasse dar, die all diese Anforderungen erfüllen kann. In seinem Vortrag

präsentierte *Sebastian Hasenstab-Riedel* neue Ansätze, die auf der Verwendung von reaktiv-ionischen Flüssigkeiten basieren. Diese Ansätze adressieren industrielle Verfahren, die für die Herstellung von Basischemikalien von Relevanz sind. Sie ermöglichen die Nutzung von Biomasse und leisten einen Beitrag zur indirekten Stromspeicherung. Somit kann diese Stoffklasse einen signifikanten Beitrag zur erforderlichen Transformation der chemischen Industrie sowie zur Sektorenkopplung Chemie/Energie leisten.

Die zentrale Aussage des Vortrags von *Ernst-Peter Jeremias, Norbert Mertsch* und *Gerhard Pfaff* (alle MLS) war, dass Klimaschutz in Deutschland nicht an Physik, Technik oder Rohstoffen scheitert, sondern vor allem an politischer Inkonsistenz. Der Klimawandel ist keine Frage politischer Meinungen, sondern eine naturwissenschaftlich gut belegte Tatsache, auch Folge steigender Treibhausgasemissionen. Internationale Klimaziele und nationale Klimaschutzgesetze sind daher notwendige Reaktionen auf physikalische Prozesse, zeitverzögerte Wirkungen und absehbare Risiken für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft. Klimaschutz ist damit untrennbar mit Energie-, Industrie- und Ressourcenpolitik verbunden. Aus wissenschaftlicher Sicht gilt die Kombination aus dem Ausbau erneuerbarer Energien und der Elektrifizierung von Wärme, Mobilität und Industrie als effizientester derzeit verfügbarer Pfad zur Emissionsminderung. Wind- und Solarenergie zeichnen sich durch sinkende Kosten, hohe Skalierbarkeit und geringe Umweltwirkungen im Betrieb aus. Im Stromsektor wurden in Deutschland deutliche Fortschritte erzielt. Gleichzeitig bestehen strukturelle Defizite bei Netzen, Speichern und der Flexibilisierung des Energiesystems, die den Übergang in die Endverbrauchssektoren erheblich bremsen. Im Verkehrssektor ist die Evidenz eindeutig: Batterieelektrische Antriebe sind dem Verbrennungsmotor hinsichtlich Energieeffizienz und Emissionsminderung deutlich überlegen. Ihr Hochlauf wird jedoch bislang noch durch politische Unsicherheiten, volatile Förderbedingungen und infrastrukturelle Ungleichgewichte gehemmt. Zudem reicht ein reiner Austausch von Antriebstechnologien nicht aus; erforderlich sind integrierte und intelligente Mobilitätskonzepte. Der Vortrag zeigte auf, dass die Ressourcenfrage zunehmend in den Fokus rückt. Die Energiewende ist zugleich eine Rohstoffwende. Kritische Materialien sind unverzichtbar, jedoch grundlegend von fossilen Energieträgern zu unterscheiden: Sie werden nicht verbraucht, sondern in technischen Systemen gebunden und sind prinzipiell recycelbar. Die Ausführungen zeigten deutlich: Klimaschutz ist technologisch machbar und ökonomisch sinnvoll. Die

größten Risiken liegen nicht im Mangel an Technologien oder Rohstoffen, sondern in fehlender Konsistenz, Verlässlichkeit und Geschwindigkeit politischer Entscheidungen.

Der Vortrag *Meeting the Critical Raw Materials Act mining targets: A probability analysis for strategic rare earth elements* von Melike Yildirim Ayyildiz, Jasemin A. Ölmez und Christoph Hilgers (alle Karlsruher Institut für Technologie) führte aus, wie die Europäische Union anstrebt, ihre Abhängigkeit von kritischen und strategischen Rohstoffen zu verringern, die für Technologien im Bereich der sauberen Energie und für Verteidigungsanwendungen unerlässlich sind. Der Vortrag zeigte, davon abgeleitet, auf, dass mit dem Gesetz über kritische Rohstoffe (CRMA) Richtwerte festgelegt wurden, bis 2030 mindestens 10% des jährlichen Bedarfs der EU an strategischen Rohstoffen durch den heimischen Bergbau zu decken. Die in den Ausführungen vorgestellte Studie bewertete die Machbarkeit der Erreichung dieses Richtwerts für strategische Seltenelemente, die für Technologien wie Elektrofahrzeuge und Windkraftanlagen benötigt werden. Für die Lagerstätte Norra Kärr in Schweden wurde eine probabilistische Bewertung unter Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, um die Wahrscheinlichkeit der Erreichung des 10-Prozent-Benchmarks zu analysieren. Angesichts der Unsicherheiten bei der Erreichung der geplanten Fördermenge und des geplanten Gehalts folgte die Analyse den PERC-Berichtsstandards und wendete eine Unsicherheit von $\pm 50\%$ an, was dem Stand der Vorstudie des Projekts entspricht. Da das Ergebnis von zukünftigen Nachfrageprognosen abhängt, wurden Literaturdaten zu strategischen Seltenen Erden für Szenarien mit niedriger und hoher Nachfrage sowie von der EU veröffentlichte Daten zur zukünftigen Nachfrage nach Seltenen Erden als Eingabeparameter für die Simulation verwendet. Die vorgestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Erfüllung des CRMA-Benchmarks bei dem ursprünglich geplanten Produktionsstart in ausgewählten Szenarien sowohl mit geringer als auch mit hoher Nachfrage machbar wäre, während dies laut EU-Daten wahrscheinlich nicht machbar ist. Allerdings ist die Projektentwicklung verzögert und damit eine Erreichung des Benchmarks unwahrscheinlich. Darüber hinaus untersuchte die Studie Diversifizierungsstrategien, die von Industrienationen – darunter die Vereinigten Staaten, Japan, Südkorea, Australien und die EU – verfolgt werden, und analysierte die Zeiträume, die für den Aufbau von Lieferketten vom Bergbau bis zur Produktion schwerer Seltener Erden erforderlich sind, veranschaulicht anhand einer Fallstudie zur Partnerschaft zwischen Japan und Australien.

Carlo Burkhardt (Hochschule Pforzheim) führte in seinem Vortrag *Recycling von Seltenen-Erden-Magneten* aus, dass die Einrichtung einer Kreislaufwirtschaft für Seltene Erden (SE) in Europa aus ökologischen und sozialen Gründen sowie im Sinne einer optimalen Unternehmensführung (ESG: Environmental, Social and Governance), aber auch zur Minderung des Risikos von Lieferkettenunterbrechungen von entscheidender Bedeutung ist. Die Gewinnung und Verarbeitung von Seltenen Erden ist mit starken Umweltbelastungen verbunden, darunter mit erheblichen CO₂-Emissionen und der Zerstörung von Lebensräumen. Durch das Recycling und die Wiederverwendung dieser kritischen Materialien kann Europa Umweltschäden reduzieren, einen Beitrag zu den Klimazielen leisten und Initiativen zur sozialen Verantwortung unterstützen. Die Sicherheit der Lieferkette ist ein dringendes Anliegen, da Europa nach wie vor in hohem Maße von Importen aus Regionen mit geopolitischen Spannungen abhängig ist, insbesondere von China, das den größten Teil der Seltenerdproduktion kontrolliert. Diese Abhängigkeit setzt Schlüsselindustrien wie die Automobilindustrie, die Elektronikindustrie und die Branche der erneuerbaren Energien erheblichen Risiken aus. Das Gesetz über kritische Rohstoffe (CRMA) betont die strategische Bedeutung der Sicherung von Rohstoffen durch nachhaltige und kreislaufwirtschaftliche Lösungen. Eine Kreislaufwirtschaft entspricht den Zielen des CRMA, indem sie die Importabhängigkeit verringert, technologische Innovationen fördert und die industrielle Wettbewerbsfähigkeit und ökologische Nachhaltigkeit Europas sicherstellt. Die Einrichtung einer Kreislaufwirtschaft für Seltenerd-Permanentmagnete in Europa steht jedoch vor mehreren Herausforderungen: Ein großes Hindernis ist die Komplexität der Recyclingprozesse, da Seltenerd-magnete oft tief in elektronischen Geräten eingebettet sind, was die Trennung schwierig und kostspielig macht. Darüber hinaus behindert die begrenzte Verfügbarkeit von Sammel- und Recyclinginfrastrukturen eine effiziente Materialrückgewinnung. Technologische Einschränkungen und uneinheitliche Abfallklassifizierungsstandards in den europäischen Ländern erschweren die Bemühungen zusätzlich. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sind koordinierte Lösungen und Investitionen in fortschrittliche Recyclingtechnologien sowie die Schaffung eines harmonisierten Rechtsrahmens zur Standardisierung der Sammlung und Verarbeitung von Abfall erforderlich. Der Vortrag stellte die neuesten Entwicklungen bei den Recyclingtechnologien entlang der gesamten Wertschöpfungskette vor und untersuchte, wie eine verstärkte Zusam-

menarbeit zwischen Industrie, Wissenschaft und Regierungen dazu beitragen kann, Innovationen voranzutreiben und bewährte Verfahren auszutauschen.

In seinem Vortrag *Siliziumproduktion für Photovoltaik in Deutschland* stellte Axel Müller (Universität Oslo, MLS) dar, welche Bedeutung das natürliche Mineral Quarz (SiO_2) als Hauptrohstoff für die Herstellung von Wafern für die Solarzellenproduktion über die Zwischenprodukte Rohsilizium, Polysilizium und monokristallines Solarsilizium hat. In Deutschland war die Siliziumhütte der RW Silicium GmbH in Pocking (Niederbayern) in Betrieb, der einzige Rohsiliziumproduzent in Deutschland mit einem Weltmarktanteil im Jahr 2023 von 1,4%. Das Werk schloss am 31. Dezember 2025, und allen 110 Beschäftigten wurde gekündigt. Als Gründe für die Schließung werden hohe Strompreise, eine rückläufige Nachfrage im Zuge der deutschen Industriekrise sowie starker Preisdruck durch preisgünstiges Silizium, insbesondere aus China, genannt. Damit ist die Basis der Wertschöpfungskette für die Siliziumwaferproduktion in Deutschland entfallen, und 100% des Rohsiliziums für die Solarzellenherstellung in Deutschland müssen importiert werden. Das steht im Kontrast dazu, dass Deutschland beim Ausbau der Photovoltaik in Europa führend ist: Anfang 2025 waren über 100 Gigawatt (GW) installiert, die mit bis zu 16% zur gesamten inländischen Stromproduktion beitragen. Axel Müller beleuchtete in seinem Vortrag die Situation bei den Siliziumrohstoffimporten und die damit verbundenen Importabhängigkeiten sowie die daraus resultierenden Konsequenzen für die Wertschöpfungskette der Solarzellen- und Solarenergieproduktion in Deutschland.

In einem weiteren Vortrag des Kolloquiums referierte Axel Müller (Universität Oslo, MLS) zum Thema *Uranwirtschaft im Wandel – Exploration, Gewinnung, Perspektiven*. Die EU ist in hohem Maße auf Uran für die Kernenergieproduktion angewiesen, die etwa 25% des Stroms innerhalb der Wirtschaftsunion liefert. Derzeit betreiben 12 der 27 EU-Mitgliedstaaten, Belgien, Bulgarien, Tschechien, Finnland, Frankreich, Ungarn, die Niederlande, Rumänien, die Slowakei, Slowenien, Spanien und Schweden, Kernkraftwerke. Einige dieser Länder produzieren nicht nur nuklearen Strom, sondern exportieren ihn auch in ihre Nachbarländer. Uran sieht sich jedoch wachsenden Risiken in der Lieferkette gegenüber: Die EU ist stark abhängig von Importen von Roh-Uran aus Kasachstan, Russland und Australien sowie von Russland für die Urananreicherung und die Herstellung von Brennstäben. Diese Abhängigkeiten und die generell sich verschärfende geopolitische Situation haben seit 2020 zu

einem starken Anstieg des Uranpreises beigetragen. Deutschland hat seine Kernkraftwerke im Jahr 2023 stillgelegt. Obwohl Deutschland eine Schwerpunktversorgung mit erneuerbarer Energie anstrebt, ist es insbesondere bei geringer Wind- und Solarenergieproduktion oder hoher Nachfrage unter anderem auf ausländische Kernenergie angewiesen. Importe aus Frankreich, Belgien, der Tschechischen Republik, der Schweiz und Schweden machen bis zu 2% des gesamten Strombedarfs aus. Damit sind selbst Länder wie Deutschland, die keine Kernkraftwerke mehr betreiben, vom Import nuklearer Energie abhängig und von den damit verbundenen Uranbereitstellungs- und Lieferrisiken betroffen. Im Vortrag gab *Axel Müller* einen Überblick über die Aktivitäten und Akteure in der Uranerkundung-, -gewinnung und -anreicherung. Außerdem werden die Risiken entlang der Lieferkette analysiert und die aktuellen sowie zukünftigen Auswirkungen auf die Nuklearenergieproduktion in Europa und weltweit erörtert.

Sebastian Tappe (Technische Universität Bergakademie Freiberg) verwies zu Beginn seines Vortrags *Muss sich klassische Lagerstättenlehre an aktuellen Rohstofftrends anpassen?* auf die tiefgreifenden Zäsuren, die aktuell die internationale Staatengemeinschaft erschüttern. Unsichere Zeiten und militärische Konflikte haben allerdings seit jeher Rohstofftrends geprägt. Hinzu kommt im 21. Jahrhundert die Erkenntnis, dass die Menschheit es lernen muss, mit den Folgen des Klimawandels umzugehen und der Erderwärmung entgegenzuwirken. Letzteres benötigt gesicherte und zukunftsfähige Rohstoffketten, um eine Grüne Energiewende zu erreichen (Klimaneutralität bis 2045). Hochschullehrern kommt in solch oft düster anmutenden Zeiten eine besondere Verantwortung zu. Es gilt neue Generationen von Forschern, Denkern und Entrepreneuren auf die Herausforderungen der Zukunft vorzubereiten – wenn das überhaupt möglich ist. Dabei ist klassische Lehre unabkömmlich, muss aber mehr denn je Raum schaffen für neue Ideen und Konzepte. Das relativ starre Korsett einer deutschen Universität macht es den Hochschullehrern nicht immer leicht, schnell auf Änderungen in der Gesellschaft zu reagieren. Mit seinem Vortrag zeigte *Sebastian Tappe*, wie sich klassische Lagerstättenlehre und aktuelle Rohstofftrends flexibel in einem Format zusammenführen lassen, das die heutige Jugend hoffentlich für die Herausforderungen der Zukunft begeistern kann.

Zum Redaktionsschluss dieses Bandes lag der Vortrag von *Sebastian Tappe* nicht in schriftlicher Form vor. Er konnte demzufolge hier nicht mit aufgenommen werden. Informationen hierzu sind über den Referenten direkt zu erhalten.

Die Herausgeber des hier vorliegenden Bandes der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät zu Berlin stellen mit der Publikation der Vorträge des Kolloquiums *Rohstoffe und Energiebereitstellung: Innovative Ansätze und Strategien für eine gesicherte und zukunftsfähige Energieversorgung* das von den Referenten vermittelte Wissen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung. Sie gehen davon aus, dass die Beiträge in der aktuellen Diskussion um die Verfügbarkeit und die sichere Bereitstellung von Rohstoffen wichtige Informationen liefern, die in der hier vorliegenden umfassenden Form bisher so noch nicht zugänglich sind. Die Teilnahme von Rohstoffwissenschaftlern und Vertretern der geologischen Dienste sowie der Industrie trug wesentlich zu einem erfolgreichen und effektiven Kolloquium bei. Die hier nun vorliegenden Beiträge machen das in vollem Umfang deutlich.

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

Rede zur Eröffnung 5. Rohstoffkolloquium der Leibniz-Sozietät

Wolfgang Methling

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

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen,

Es ist mir eine große Ehre und Freude, die Begrüßung und Eröffnung des 5. Rohstoffkolloquiums vorzunehmen. Ich mache das als Vizepräsident der Leibniz-Sozietät, Umweltwissenschaftler und ehemaliger Landesminister für Umwelt, Mitgründer und Kuratoriumsvorsitzender der Akademie für nachhaltige Entwicklung Mecklenburg-Vorpommern.

Ich hatte bereits am 4. Rohstoffkolloquium in der TU Berlin teilgenommen und einen Vortrag aus der Recyclingwirtschaft vermittelt. Das 5. Rohstoffkolloquium verbindet die Themen Rohstoffe und Energie und präsentiert innovative Ansätze zur Gewinnung und Rückgewinnung von begrenzt verfügbaren Rohstoffen sowie zur zukunftsfähigen, sicheren Energieversorgung. Das Thema ist angesichts der gegenwärtigen explosiven politischen, wirtschaftlichen und militärischen Krisen und Konflikte von höchster Aktualität, was bei der Konzipierung des Programms so nicht bekannt war. Dafür danke ich den beteiligten Kollegen der Arbeitskreise Geo-, Montan-, Umwelt-, Weltraum- und Astrowissenschaften und Energie, Mensch und Zivilisation der Klasse Natur- und Technikwissenschaften der Leibniz-Sozietät sehr herzlich.

Lassen Sie mich vorausschicken, dass Kriege nicht nur menschliche Opfer und Umweltschäden bringen, sondern der schlimmste Verwendungszweck von Rohstoffen und Energie darstellen und alle guten Vorsätze der nachhaltigen Nutzung von Ressourcen im Keim ersticken.

Trotzdem oder gerade deshalb ist es notwendig, über wissenschaftliche Analysen und Schlussfolgerungen für die zukünftige Bereitstellung von Rohstoffen und Energieversorgung zu berichten und zu beraten.

Dazu hören wir interessante Vorträge von

- Christoph Hilgers: Rohstoff- und Energiebereitstellung im geopolitischen Kontext

- Christina Labusch: Energieerzeugung aus Ersatzbrennstoffen
- Axel Wenke: Energieinnovationen
- Sebastian Hasenstab-Riedel: reaktiv-ionische Flüssigkeiten als Resource
- Ernst-Peter Jeremias u. Kollegen: ausgebreiteter Klimaschutz in Deutschland
- Melike Yildirim Ayyildiz u. Kollegen: Analyse und Strategie zu seltenen Erden
- Carlo Burkhardt: Recycling seltener Erden
- Axel Müller: Siliziumproduktion für Photovoltaik in Deutschland
- Axel Müller: Perspektiven der Uranwirtschaft
- Sebastian Tappe: Anpassung der Lagerstättenlehre an Rohstofftrends?

Uns erwarten hier im Raum und an den heimischen Computern sehr interessante Vorträge und sicher lebhaftige Diskussionen.

Ich wünsche uns und Ihnen viele neue Erkenntnisse und Kenntnisse für Ihr Wirken in der Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft!

Rohstoff- und Energiebereitstellung: Strategien im geopolitischen Kontext

Christoph Hilgers, Melike Yildirim Ayyildiz, Jasemin A. Ölmez

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Geowissenschaften, Institut für Technologie

Abstract

This paper examines Germany's energy and raw material supply in the context of the energy transition, climate neutrality, population growth, and changing geopolitical conditions. It argues that the transition towards renewable energy systems simultaneously represents a raw materials transition, since wind power, solar energy, electricity grids, battery storage, and electric mobility require large quantities of metals and mineral resources. Global population growth, rising prosperity, urbanization, and digitalization including AI-data centers and high-performance computing (HPC) are expected to increase the long-term demand for energy and raw materials. Thus, global production of natural gas, oil and coal, together with the deployment of renewable energy technologies and global mining activity, continues to increase. At the same time, raw material supply chains are becoming increasingly important from a geopolitical perspective, particularly due to China's dominant position in the mining, processing, and refining of many critical raw materials. The paper highlights supply security, industrial competitiveness, and geopolitical resilience as essential prerequisites for a successful transformation. In addition to recycling and circular economy approaches, strategic mining projects, domestic processing capacities, international resource partnerships, and competitive energy prices are identified as key policy priorities. The energy transition is therefore not only an energy policy challenge but also a strategic issue of raw materials policy, industrial policy, and national security.

Resümee

Der Beitrag untersucht die Energie- und Rohstoffversorgung Deutschlands vor dem Hintergrund von Energiewende, Klimaneutralität, Bevölkerungswachstum und geopolitischen Veränderungen. Er zeigt, dass die Transformation zu erneuerbaren Energiesystemen zugleich eine Rohstoffwende darstellt, da Windkraft, Photovoltaik, Stromnetze, Batteriespeicher und Elektromobilität erhebliche Mengen an Metallen und mineralischen Rohstoffen benötigen. Globales Bevölkerungswachstum, steigender Wohlstand, Urbanisierung und Digitalisierung einschließlich KI-Rechenzentren und Hochleistungsrechenkapazitäten führen zu einem langfristig wachsenden Bedarf an Energie und Rohstoffen. Daher steigen sowohl die globale Förderung von Erdgas, Erdöl und Kohle als auch die Nutzung erneuerbarer Energien und der globale Bergbau. Gleichzeitig gewinnen Rohstofflieferketten zunehmend an geopolitischer Bedeutung, insbesondere aufgrund der dominierenden Rolle Chinas bei der Förderung und Verarbeitung zahlreicher kritischer Rohstoffe. Der Beitrag argumentiert, dass Versorgungssicherheit, industrielle Wettbewerbsfähigkeit und geopolitische Resilienz zentrale Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation sind. Neben Recycling und Kreislaufwirtschaft werden daher auch Bergbau, Verarbeitungskapazitäten, internationale Rohstoffpartnerschaften und wettbewerbsfähige Energiepreise als wichtige Handlungsfelder identifiziert. Die Energiewende wird somit nicht nur als energiepolitische, sondern auch als rohstoff-, industrie- und sicherheitspolitische Herausforderung verstanden.

Keywords/Schlüsselwörter

Critical Raw Materials Act, critical raw materials, energy transition, national security, supply chains, geopolitics;

Critical Raw Materials Act, kritische Rohstoffe, Energiewende, nationale Sicherheit, Lieferketten, Geopolitik

1 Einleitung

Die gewünschte Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland und Europa hin zu Klimaneutralität und nachhaltiger Entwicklung verändert die Anforderungen an Energie- und Rohstoffversorgung grundlegend. Während die öffentliche Debatte häufig von Klimaschutz, Dekarbonisierung und Energiewende geprägt wird, werden die dafür erforderlichen materiellen Einsätze oftmals unterschätzt. Windkraftanlagen, Photovoltaik, Stromnetze, Batteriespeicher und

Elektromobilität benötigen erhebliche Mengen versorgungssicherer, bezahlbarer und möglichst klimaneutral gewonnener mineralischer Rohstoffe („Rohstofftrilemma“). Industrielle Produktion, Rechenzentren und digitale Infrastrukturen benötigen neben großen Mengen mineralischer Rohstoffe eine versorgungssichere, bezahlbare und möglichst klimaneutrale Energieversorgung („Energietrilemma“).

Die Weltbevölkerung wächst von derzeit rund 8,3 Mrd. Menschen weiter und wird nach den mittleren Projektionen der Vereinten Nationen in den 2080er Jahren mit etwa 10,3 Mrd. Menschen ihren Höchststand erreichen (United Nations 2024). Der Wunsch nach höherem Wohlstand, besserer Gesundheitsversorgung, moderner Infrastruktur und gesicherter Energieversorgung betrifft insbesondere die schnell wachsenden Volkswirtschaften Asiens, Afrikas und Südamerikas. Damit steigt langfristig nicht nur der Energiebedarf, sondern auch der Bedarf an Metallen und anderen Rohstoffen.

Die globalen Entwicklungsziele spiegeln sich in den 17 Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen (SDGs) wider (Tabelle 1). Die Verfügbarkeit von Energie und Rohstoffen ist eine zentrale Voraussetzung für zahlreiche Nachhaltigkeitsziele. Dazu zählt das siebte Nachhaltigkeitsziel „Bezahlbare & saubere Energie“, das SDG 8 „Menschenwürdige Arbeit & Wirtschaftswachstum“, das SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“ und weitere Nachhaltigkeitsziele.

Tab. 1: Die 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (SDGs).

1. Keine Armut	9. Industrie, Innovation und Infrastruktur
2. Kein Hunger	10. Weniger Ungleichheiten
3. Gesundheit und Wohlergehen	11. Nachhaltige Städte und Gemeinden
4. Hochwertige Bildung	12. Nachhaltige/r Konsum und Produktion
5. Geschlechtergleichheit	13. Maßnahmen zum Klimaschutz
6. Sauberes Wasser & Sanitäreinrichtungen	14. Leben unter Wasser
7. Bezahlbare & saubere Energie	15. Leben an Land
8. Menschenwürdige Arbeit & Wirtschaftswachstum	16. Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen
	17. Partnerschaften zur Erreichung der Ziele

Vor diesem Hintergrund gewinnt die deutsche und europäische Rohstoff- und Energieversorgung nicht nur im Hinblick auf die langjährigen geostrategischen Maßnahmen von Ländern wie China, Japan, Südkorea und den USA zunehmend eine geopolitische Dimension (s. z.B. Yildirim Ayyildiz et al. 2026, Hilgers et al. 2021, Hilgers 2025, Ölmez & Hilgers 2026, 2024, 2023). Aktuelle Konflikte wie im Roten Meer, im Nahen

Osten und der Russland-Ukraine Konflikt, aber auch Exportbeschränkungen weisen auf zusätzliche industrie- und sicherheitspolitische Dimensionen verfügbarer Energie und Rohstoffe hin.

In diesem Beitrag werden einige aktuelle Aspekte zur nationalen Energie- und Rohstoffversorgung im globalen Kontext diskutiert, da Versorgungssicherheit, industrielle Wettbewerbsfähigkeit und nationale Resilienz zentrale Elemente der Wirtschafts- und Sicherheitspolitik sind.

2 Globale Megatrends: Wohlstand, Bevölkerung und Ressourcenbedarf

Die globalen Megatrends wie Bevölkerungswachstum und demographischer Wandel, Wirtschaftswachstum und steigender Wohlstand, technologischer Fortschritt, Urbanisierung, Digitalisierung, geopolitische Machtverschiebungen, Umwelt- und Klimawandel mit einem Umbau des Energiesystems führen zu einem Spannungsfeld zwischen Nachhaltigkeit, Energie- und Rohstoffverfügbarkeit.

Die Megatrends erfordern für den Ausbau von Infrastruktur, Wohnraum, Mobilität und Energieversorgung zunehmende Mengen an Rohstoffen. Klimaschutz, Digitalisierung und Energiewende erhöhen den Rohstoffbedarf weiter. Dies gilt beispielsweise für Kupfer, Aluminium, Lithium, Nickel, Kobalt, Seltene Erden, verschiedene Spezialmetalle, aber auch Baustoffe wie Zement (s. z. B. IEA 2025). Der globale Ressourcenbedarf von Biomasse, Erdöl, Erdgas, Kohle, Metallen und nichtmetallischen Mineralen wird nach einem Szenario der OECD von 89 Gt in 2017 auf 167 Gt in 2060 steigen (OECD 2019: 19). Davon nehmen die nichtmetallischen Minerale von 44 Gt (2017) auf 86 Gt (2060) den größten Anteil ein (OECD 2019: 124) (Tabelle 2).

Tab. 2: Ressourcenbedarf zwischen 2017 und 2060 nach einem Szenario der OECD (Daten aus OECD 2019: 124).

	2017	2020	2030	2060
Weltbevölkerung (Mrd.)	7.5	7.7	8.5	10.2
Globales BIP (Bio. USD, PPP 2011)	115	129	175	373
Extraktion (Gt) von	89	96	111	167
Biomasse (Gt)	22	22	26	37
fossilen Rohstoffen (Gt)	15	16	17	24
Metalle (Gt)	9	9	12	20
nichtmetallische Minerale (Gt)	44	48	56	86

Die globale Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte zeigt einen engen Zusammenhang zwischen Bevölkerungswachstum, wirtschaftlicher Entwicklung und Rohstoffverbrauch. Die Weltbevölkerung hat sich seit 1970 von etwa 4 Milliarden auf über 8 Milliarden Menschen erhöht. Parallel dazu stiegen Wirtschaftsleistung, Urbanisierung und industrielle Produktion mit entsprechend wachsendem Ressourcenbedarf von Energie und Rohstoffen.

Trotz Effizienzsteigerungen und teilweisen Entkopplungstendenzen in manchen Industrieländern steigt der absolute und pro-Kopf Rohstoffverbrauch weiterhin an (Tabelle 2).

Der Anteil der Weltbevölkerung, der in urbanen Gebieten lebt, stieg von 36% (1970) auf 58% (2025) und zeitgleich in Deutschland von 80% (1970) auf 82% (2025) (United Nations 2025). Die häufig verwendeten Urbanisierungsindikatoren basieren auf administrativen oder funktionalen Definitionen urbaner Räume. Sie erfassen neben Metropolräumen auch zahlreiche Klein- und Mittelstädte sowie suburbane Gemeinden. Ein hoher Urbanisierungsgrad allein erlaubt keine unmittelbaren Rückschlüsse auf Siedlungsdichte, Wohnformen oder Infrastrukturen. Die Urbanisierung geht nach UNEP (2024: 23) mit einer zunehmenden Konzentration von Energie-, Material- und Infrastrukturbedarf sowie mit steigenden absoluten Ressourcenströmen einher.

Mit wachsendem Wohlstand, einhergehend mit einem steigenden Bedarf an Energie und Rohstoffen, verbessern sich vielfach Lebensqualität und Lebenserwartung.

2.1 Energiewende als Rohstoffwende

Der globale Anteil von Erdgas, Erdöl und Kohle am globalen Energieverbrauch ist prozentual rückläufig und lag 2025 bei 81% (1970 noch 94%). Auch Deutschland konnte den Anteil von Erdgas, Erdöl und Kohle für die Energieversorgung um 22% reduzieren (1970: 98%, 2025: 77%) (Our World in Data 2025a). Global betrachtet stieg der Verbrauch von Erdgas, Erdöl und Kohle (Abbildung 1) kontinuierlich an und erreichte im Jahr 2025 mit 41.964 TWh Erdgas, 54.673 TWh Erdöl, 50.210 TWh Kohle einen neuen Höchststand (Our World in Data 2026a, b, c).

Trotz hoher Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Energien bleibt der Anteil fossiler Energieträger am deutschen Primärenergieverbrauch seit 2019 mit rund 77% weiterhin hoch (Abbildung 1) (AGEB 2026a) und liegt damit rund 4 Prozentpunkte unter dem globalen Durchschnitt.

Der absolute Primärenergieverbrauch Deutschlands sank zwischen 2019 und 2024 um etwa 18% (628 TWh) von 3.564 TWh (2019) auf 2.936 TWh (2024) (und 2.925 TWh in 2025, AGEB 2026b). Der Energieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes sank im selben Zeitraum bis 2024 um 14% (Abbildung 2) (Destatis 2026). Ursachen sind die rückläufige energieintensive Industrieproduktion, Effizienzsteigerungen sowie der Ausbau erneuerbarer Energien (z. B. AGEB 2026b).

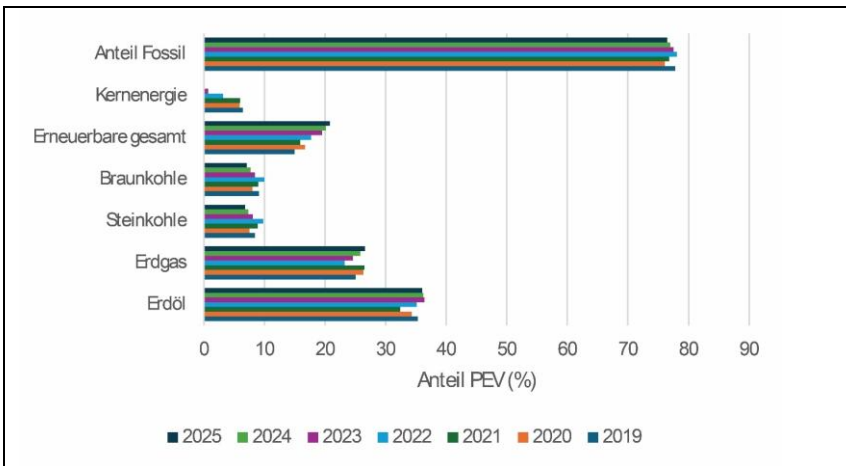


Abb. 1: Relativer Primärenergieverbrauch (PEV) Deutschlands nach AGEB (2026b).

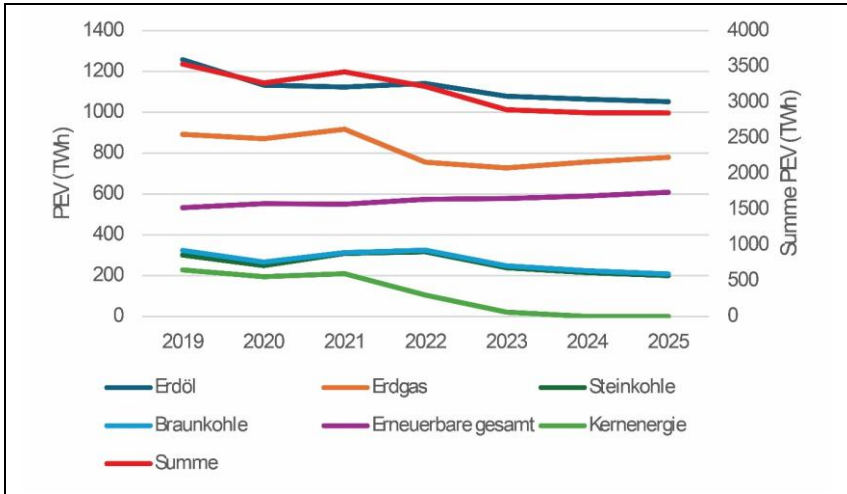


Abb. 2.: Absoluter Primärenergieverbrauch Deutschlands nach AGEb (2026c).

Zwischen 2019 und 2024 stieg die installierte Leistung erneuerbarer Energien in Deutschland um etwa 60 GW auf rund 190 GW. Im Jahr 2024 wurden 136,4 TWh Strom aus Windkraftanlagen und 72,2 TWh Strom aus PV-Anlagen erzeugt. Die PV-Anlagen speisten 59,8 TWh ins Netz ein, 12,4 TWh wurde selbst genutzt (Fraunhofer 2025). Erneuerbare Energiesysteme benötigen ein Mehrfaches an Materialmengen pro erzeugter Energieeinheit und mehr Landfläche als konventionelle Systeme und erfordern den Ausbau der Rohstoffgewinnung und Lieferketten (IEA 2022). Windkraftanlagen enthalten große Mengen Stahl, Kupfer und Spezialmetalle. Photovoltaikanlagen benötigen Aluminium, Silizium, Kupfer und Silber. Batteriespeicher und Elektromobilität erhöhen die Nachfrage nach Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und weiteren Rohstoffen.

Ein geologischer Mangel an mineralischen Rohstoffen besteht gegenwärtig nicht. Die Herausforderungen bestehen vor allem in den Bereichen Exploration, Genehmigungsverfahren, Finanzierung und Wirtschaftlichkeit, Verarbeitungskapazitäten, Verfügbarkeit und geopolitische Risiken von Primär- und Sekundärrohstoffen. Ausreichende Explorationsmaßnahmen und neue Technologien zur Effizienzsteigerung bei Erkundung, Gewinnung und Weiterverarbeitung können die langfristige Verfügbarkeit von Rohstoffen verbessern.

Die Transformation des deutschen Energiesystems erzeugt neue Anforderungen an Stromnetze, Speichertechnologien, Reservekapazitäten und industrielle Prozesse. Energieintensive Industrien stehen dabei unter besonderem Druck. Hohe Energiepreise, regulatorische Anforderungen sowie verschärfte Umwelt- und Emissionsvorgaben beeinflussen Investitionsentscheidungen zunehmend.

2.2 Industrielle Wettbewerbsfähigkeit und Rohstoffverarbeitung

Die deutsche Wirtschaftsleistung entwickelte sich zwischen 2019 und 2025 weitgehend stagnierend. Nach dem pandemiebedingten Einbruch von 4,1% des inflationsbereinigten Bruttoinlandsprodukts (BIP) im Jahr 2020 folgte eine Erholung in den Jahren 2021 und 2022 (Abbildung 3). Anschließend schrumpfte die Wirtschaft erneut in den Jahren 2023 und 2024. Für 2025 wird ein reales Wachstum von nur 0,2% ausgewiesen. Insgesamt lag die reale Wirtschaftsleistung damit nur geringfügig über dem Niveau von 2019.

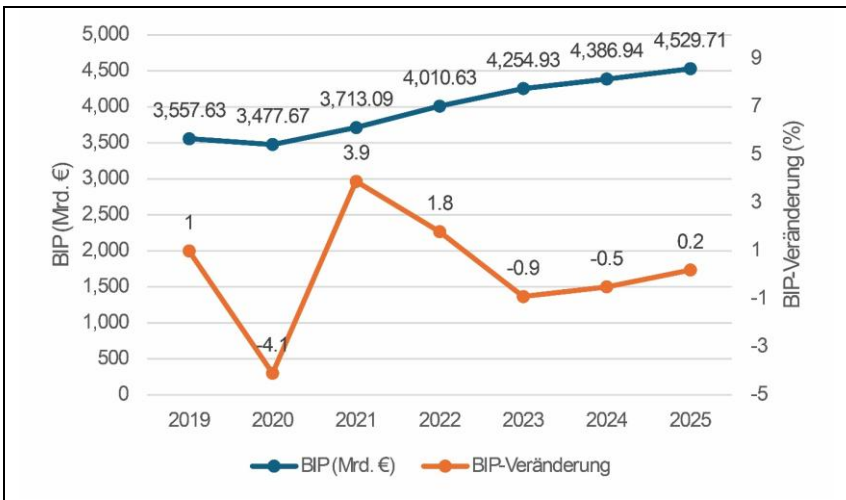


Abb. 3: Wirtschaftsleistung Deutschland als nominales BIP (enthält Preissteigerungen und ist nicht inflationsbereinigt), Destatis 2026b) und als reale BIP-Veränderung gegenüber dem Vorjahr, inflationsbereinigt (Destatis 2026c).

Die Finanzierung des weiteren Umbaus des deutschen Energiesystems setzt weiterhin global wettbewerbsfähige und innovative Industrie- und

Dienstleistungssektoren voraus. Insbesondere die exportorientierten Branchen Deutschlands mit hoher Wertschöpfung erwirtschaften einen erheblichen Teil der finanziellen Ressourcen, die für Investitionen in Infrastruktur, Energieversorgung und Dekarbonisierung erforderlich sind.

Einige Industriezweige mit hoher Wertschöpfungstiefe wie etwa die Automobilindustrie und die chemische Industrie verzeichneten teilweise einen Rückgang der Produktion in Deutschland. Im Jahr 2024 wurden in Deutschland 4,1 Mio. Pkws hergestellt. Davon wurden 3,2 Mio. PKWs exportiert. Die Produktion lag um 12% unter dem Vorkrisenjahr 2019 (VDA 2025). Der Produktionsindex der chemischen Industrie in Deutschland lag 2025 etwa 20% unter dem Niveau des Referenzjahres 2021 (VCI 2026). Exportierte Waren stehen einer inländischen Kreislauf-führung nicht zur Verfügung.

Der Anteil des Verarbeitenden Gewerbes am BIP sank in Deutschland von 25% (1991) auf 20% (1996) und reduzierte sich ab 2016 auf heute 18% (2025) (WorldBank 2026d) (Abbildung 4). Absolut ist die Wertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes Deutschlands jedoch nicht gesunken, sondern von etwa 460 Mrd. USD (1991, BIP nominal, laufende USD) auf knapp 890 Mrd. USD (2025) gestiegen.

Während die weltweite Wirtschaftsleistung und Produktion und damit auch der Bedarf nach Metallen weiter steigt, zeigen sich in Deutschland und teilweise auch in Europa rückläufige Entwicklungen insbesondere bei den energieintensiven und metallverarbeitenden Industrien. Dies betrifft unter anderem Bereiche der Aluminium-, Stahl- und Kupferraffination. Das letzte deutsche Werk zur Herstellung von metallurgischem Silizium, das von der EU als kritischer und strategischer Rohstoff eingestuft wird, stellte Ende 2025 aufgrund hoher Energiekosten und zunehmendem Wettbewerb durch chinesische Exporte den Betrieb ein. Metallurgisches Silizium ist ein wichtiger Grundstoff für Halbleiter, Leistungselektronik und andere Schlüsseltechnologien.

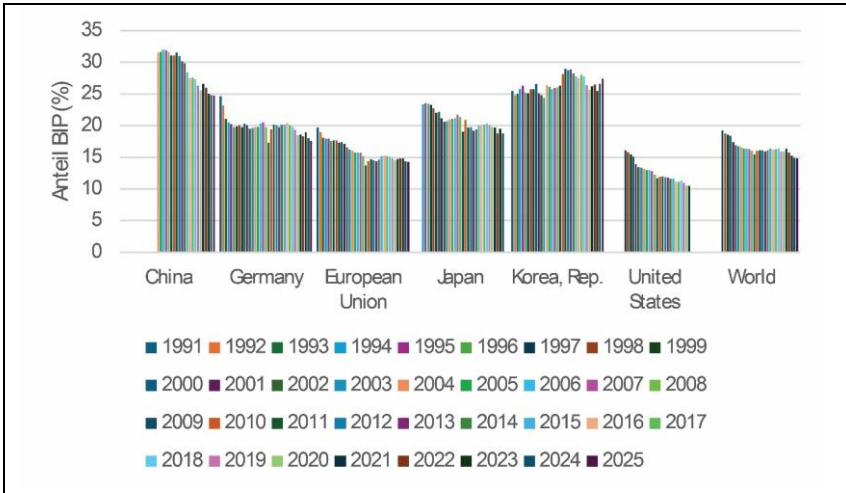


Abb. 4: Anteil des Verarbeitenden Gewerbes am BIP (Weltbank 2026).

2.3 Rohstoffbedarf

Der Rohstoffbedarf stieg nach UNEP (2024: 26) von 30 Gt (1970) auf 95 Gt (2020), und der globale Pro-Kopf-Verbrauch von 8,4 auf 12,2 t pc. In den rohstoffexportierenden Ländern Australien und Kanada ist die Rohstoffextraktion pro-Kopf mit 99 t/a bzw. 63 t/a (in 2020) am höchsten, pro Land liegt China mit über 31,3 Gt vor den USA (7,6 Gt), Indien (6,6 Gt) und Brasilien (4,8 Gt) (in 2020) (UNEP 2024: 28). Seit etwa 2014 entwickelte sich die Ländergruppe mit mittlerem gehobenem Einkommen (z.B. China, Brasilien, Mexiko, Südafrika, Thailand, Türkei, Aserbaidschan u.a.) durch deren schnelle Industrialisierung und die Verlagerung globaler Produktion in diese Länder von einem netto-Exporteur zu einem netto-Importeur von Rohstoffen (UNEP 2024: 30). Entsprechend kehrten sich die mobilisierten Ressourcen (Materialfußabdruck) zwischen 2000 und 2020 von den Hoheinkommensländern in die Mitteleinkommensländer um, die inzwischen 51% des globalen Materialfußabdrucks auf sich vereinen (Hoheinkommensländer 34%).

Der Anteil der Biomasse an der Gesamtextraktion reduzierte sich in der Zeit 1970 bis 2020 von 41% auf 33%, während sich der globale Anteil der nichtmetallischen Minerale insbesondere durch Infrastrukturmaßnahmen im Globalen Süden von 31% auf 48% erhöhte (UNEP 2024: 26).

Im Jahr 2005 wurden global 4,5 Gt Erze für die Metallverarbeitung gewonnen (Haas et al. 2015), im Jahr 2020 bereits 9,5 Gt (Abbildung 5). Insbesondere der Ausbau der Infrastruktur im Globalen Süden führte zu einer starken Nachfrage nach Stahl und mineralischen Baustoffen. Die zunehmende Elektrifizierung führt zu einer starken Zunahme der Nachfrage nach Stromleitungen (Kupfer, Aluminium) und Stromspeichern (Lithium, Nickel, Kobalt).

Der Großteil der gewonnenen Primärrohstoffe sind jedoch nichtmetallische Minerale (22 Gt in 2005), die zu 95% für den Bau verwendet werden (Sand, Kies, Natursteine, Ton), aber auch für die Glasindustrie, chemische Industrie, Düngemittelindustrie u.a. (Haas et al. 2015).

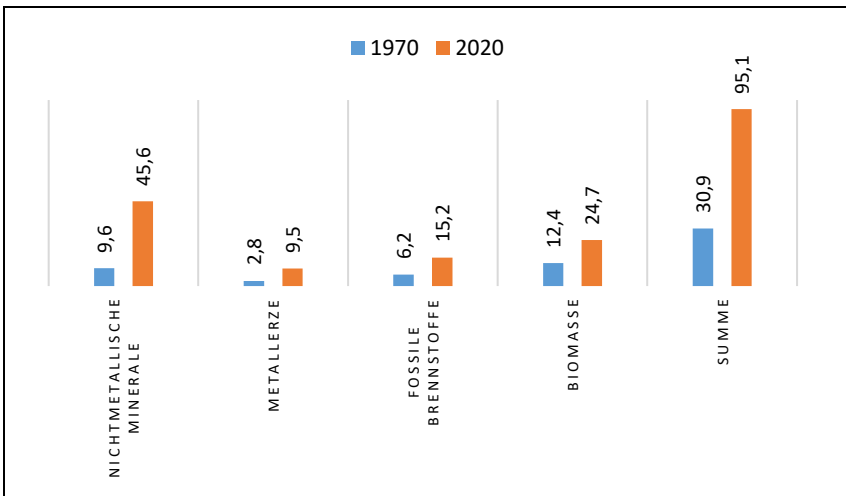


Abb. 5: Rohstoffextraktion 1970 und 2020 mit dem Anteil in Gt (nach UNEP 2024: 27).

Der globale Anteil an recycelten Sekundärrohstoffen im verarbeitenden Gewerbe und Bauwesen lag bei 9% (2019) und könnte bei Verbesserung der Kreislaufsysteme auf 30 bis 40% erhöht werden (UNEP 2024: 25). Auch bei dieser Effizienzsteigerung müssen 60 bis 70% der Rohstoffe primär aus Lagerstätten gewonnen werden.

Die Erschließung neuer Lagerstätten ist ein langwieriger und kapitalintensiver Prozess. Zwischen Exploration, Genehmigung, Minenentwicklung und Produktionsbeginn liegen häufig 15 bis 30 Jahre mit Investitionssummen im Milliardenbereich. Die diskutierten Rohstoffbedarfe der Energiewende und industriellen Produktion können daher nicht

kurzfristig durch neue Produktionskapazitäten gedeckt werden, sondern bedürfen langfristiger Investitionsentscheidungen zur Sicherung von Lieferketten.

2.4 Technologische Entwicklung

Der wachsende Bedarf an Rohstoffen geht mit Bevölkerungs- und Wohlstandswachstum einher. Der Beitrag technologischer Entwicklungen zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Materialverbrauch hat seit 2000 an Wirkung verloren. Etwa ein Drittel der erwartbaren globalen Zunahme wurde zwischen 1970 und 2000 durch technologische Entwicklungen kompensiert (UNEP 2024: 38). Dazu zählen technologische Effizienzsteigerungen, erhöhte Recyclingquoten, Änderungen des Konsumverhaltens und/oder politische Maßnahmen.

Zwischen 2000 und 2024 konnten technologische Entwicklungen lediglich rund 6% der erwartbaren Zunahme des Materialverbrauchs kompensieren (UNEP 2024: 38). Mögliche Ursachen der abnehmenden Effizienzgewinne könnten Rebound-Effekte, das starke Wachstum materialintensiver Infrastruktur in Schwellenländern sowie die begrenzte Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen sein. Dadurch konnten technologische Fortschritte den steigenden Ressourcenbedarf weniger kompensieren als in den Jahrzehnten zuvor.

Das IPAT-Modell wurde von Ehrlich und Holdren (1971) entwickelt. Die IPAT-Formel ($\text{Impakt} = \text{Bevölkerung} \times \text{Wohlstand} \times \text{Technologie}$) beschreibt Umweltbelastungen als Ergebnis des Zusammenspiels von Bevölkerungsgröße, Wohlstandsniveau und Ressourcenintensität. Dabei umfasst der Technologiefaktor nicht nur technische Innovationen, sondern alle Einflussgrößen, die nicht durch Bevölkerungswachstum oder Einkommen pro Kopf erklärt werden können. Das Modell dient dazu, die wichtigsten Treiber des Material- und Ressourcenverbrauchs auf gesamtwirtschaftlicher Ebene zu analysieren.

3 Geopolitik der Rohstoffe

Die weltweiten Rohstoffmärkte werden zunehmend von neuen geopolitischen Interessen beeinflusst. Besonders China hat sich in den vergangenen Jahrzehnten entlang zahlreicher Wertschöpfungsketten strategisch zur wirtschaftlichen Entwicklung des eigenen Landes positioniert und verfügt heute vielfach über dominierende Marktanteile bei Förderung, Verarbeitung und Raffination kritischer Rohstoffe. Dies umfasst den Bergbau im Inland, Investitionen in ausländische Bergbauprojekte, die

Aufbereitung und Raffination der geförderten Rohstoffe, die Herstellung von Halb- und Hochtechnologie-Endprodukten in China und das Recycling.

Beispielsweise ist die Produktion von Seltenen Erden stark in China konzentriert. Rund 70% der weltweiten Förderung stammen aus China. Bei der Trennung und Raffination von Seltenen Erden liegt der chinesische Anteil bei etwa 90%. Noch stärker ist die Konzentration bei der Herstellung von Seltenerd-Permanentmagneten, wo China rund 94% der weltweiten Produktionskapazität bereitstellt. Der geostrategische und finanzielle Aufwand anderer Länder wie Japan, die Lieferketten von Rohstoffen zu diversifizieren, wird in Yildirim Ayildiz et al. (2026) und Yildirim Ayildiz et al. (dieser Band) diskutiert.

Auch für Europa ergeben sich erhebliche Abhängigkeiten. Die Europäische Union hat deshalb mit dem Critical Raw Materials Act (CRMA) neue strategische Richtwerte formuliert. Bis 2030 sollen unter anderem mindestens 10% des jährlichen Bedarfs strategischer Rohstoffe durch Bergbau innerhalb der EU gedeckt werden, mindestens 40% durch Verarbeitung innerhalb der EU erfolgen, mindestens 25% aus Recycling stammen und die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern deutlich reduziert werden. Demnach soll kein Drittland mehr als 65% des Jahresverbrauchs an strategischen Rohstoffen für die EU bereitstellen dürfen (EU 2024). Diese Richtwerte verdeutlichen, dass Versorgungssicherheit künftig stärker als Teil strategischer Souveränität verstanden wird. Aktuelle Studien bezweifeln, dass die im CRMA definierten Richtwerte bis 2030 erreicht werden (Hilgers 2025, Yildirim Ayildiz et al. 2026).

Besondere strategische Bedeutung kommt den globalen Handels- und Transportwegen sowie ihrer sicherheitspolitischen Absicherung zu. Bereits temporäre Beeinträchtigungen an maritimen Schlüsselrouten wie gegenwärtig in der Straße von Hormus können erhebliche Folgen auf den globalen Energie- und Rohstoffmärkten haben. Die Versorgung Europas mit Erdöl, petrochemischen Vorprodukten, Flüssigerdgas (LNG), Düngemitteln, Metallen wie Aluminium und weiteren Rohstoffen ist eng mit der Stabilität solcher Handelsrouten verknüpft.

4 Was wurde bisher erreicht?

Die weltweite Wirtschaftsleistung ist trotz Pandemie, geopolitischer Konflikte und wirtschaftlicher Unsicherheiten weiter gestiegen. Besonders dynamisch entwickelten sich China, die USA und Südkorea. Während die Wirtschaftsleistung pro Kopf in den USA seit 2019 um rund ein

Drittel zunahm und China sogar Zuwächse von deutlich über 50% erreichte, lagen Deutschland und die Europäische Union nur im Bereich von etwa 20% (Tabelle 3). Auch der materielle Wohlstand und die Lebensqualität des globalen Südens sind erheblich gestiegen (UNEP 2024: 19). Deutschland verzeichnet seit mehreren Jahren nur geringe Wachstumsraten im internationalen Bereich.

Tab. 3: Kaufkraftbereinigtes Bruttoinlandsprodukt pro Kopf im Jahr 2024 (Kaufkraftparität (PPP); laufende, nicht inflationsbereinigte internationale Dollar (current international dollars)) (WorldBank 2026a). Das nominale BIP pro Kopf ist deutlich niedriger.

Land/Region	2019 (PPP pc, int.\$)	2024 (PPP pc, int.\$)	Veränderung seit 2019 (%)
China	17600	27100	+54
Deutschland	59300	73900	+25
EU-27	55800	66000	+18
Italien	46700	62300	+33
Schweden	56900	71200	+25
Spanien	44000	58000	+32
Südkorea	46500	61100	+31
USA	65200	86200	+32
Welt	18100	24500	+35

Nach den Rückgängen von 2020 bis 2023 erreichte das Reallohneinkommen in Deutschland erst 2025 in nahezu allen Einkommensgruppen wieder das Reallohnniveau von 2019 vor der Corona-Pandemie (Destatis 2026d). Das kaufkraftbereinigte BIP pro Kopf lag in Deutschland bei 73.900 int. USD (2025), das nominale, nicht kaufkraftbereinigte BIP pro Kopf bei 56.104 USD (WorldBank 2026a).

Gleichzeitig sank weltweit der Anteil der Menschen, die in extremer Armut leben, von 50% (1970) auf 9% in 2018 (Our World in Data 2021).

Seit etwa 2011 stabilisieren sich die globalen CO₂-Emissionen bei etwa 5 t pro Kopf, obwohl Bevölkerung und Wirtschaftsleistung weiter zunehmen (Tabelle 4).

Die Lebenserwartung erhöhte sich weltweit von 71 Jahren (2015) auf 73-74 Jahre (2024) und der Zugang zu Energie, Bildung und Gesundheitsversorgung konnte ausgeweitet werden. Deutschland lag 2024 bei

81 Jahren im europäischen Durchschnitt, aber unterhalb der Lebenserwartung von Italien, Schweden und Spanien (84 Jahre). In Kuwait und Hongkong liegt die Lebenserwartung bei 85 Jahren, in Monaco und San Marino bei 86 Jahren (WorldBank 2026b). Italien und Spanien erzielen mit etwa USD 5.000, Schweden mit etwa USD 7.700 eine höhere Lebenserwartung als Deutschland mit etwa USD 8.800 (WorldBank 2026c).

Tab. 4: CO₂-Emissionen pro Kopf (Our World in Data 2025b).

Region/Land	2019 pc	2024 pc	Veränderung (%)
China	7.53	8.66	15
Deutschland	8.48	6.77	-20
EU-27	6.49	5.39	-17
Italien	5.65	5.09	-10
Japan	8.7	7.77	-11
Spanien	5.28	4.6	-13
Südkorea	12.48	11.29	-10
Schweden	3.97	3.59	-10
USA	15.5	14.2	-8
Welt	4.75	4.73	0

Diese positiven globalen Entwicklungen zeigen, dass technologische Innovation, wirtschaftliche Entwicklung und Umweltpolitik nicht zwangsläufig Gegensätze darstellen. Die Herausforderung besteht vielmehr darin, positive Entwicklungen zu beschleunigen und gleichzeitig Versorgungssicherheit sowie gesellschaftlichen Wohlstand zu gewährleisten.

Trotz Fortschritten bei Energieeffizienz, Recycling und Kreislaufwirtschaft nimmt die globale Rohstoffgewinnung seit 2019 weiter zu. Dies betrifft die Gewinnung metallischer Erze sowie nichtmetallischer Minerale, aber auch die globale Gewinnung von Erdgas, Erdöl und Kohle. Zu dieser Entwicklung zunehmenden Energie- und Rohstoffbedarfs tragen der Ausbau von Infrastruktur, Urbanisierung, Digitalisierung einschließlich KI-Rechenzentren und Hochleistungsrechenkapazitäten sowie die Energiewende bei.

Die Daten verdeutlichen, dass wirtschaftliche Entwicklung und die Reduktion prozessbedingter und energetischer CO₂-Emissionen gegenwärtig nicht mit einem sinkenden globalen Energie- und Rohstoffbedarf einhergehen, sondern vielfach zusätzliche Materialströme erfordern (UNEP 2024).

5 Diskussion

Der Anstieg von Weltbevölkerung und des Wohlstands sowie die Ambitionen zur Reduktion prozessbedingter und energetischer CO₂-Emissionen führen zu einer umfassenden Rohstoffwende mit neuen Lieferketten und neuen Abhängigkeiten. Von zentraler Bedeutung sind Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und möglichst klimaneutrale Prozesse bei gleichzeitigem Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit industrieller Wertschöpfung und Dienstleistungen. Eine erfolgreiche Transformation (Umbau) muss ökologische, ökonomische und soziale Aspekte gleichermaßen berücksichtigen.

Dabei entsteht ein strategisches Problem zur Entwicklung notwendiger, neuer Lieferketten für Rohstoffe: Die großen, in Deutschland ansässigen und international operierenden Bergbauunternehmen Preussag (heute TUI) und Metallgesellschaft (heute GEA) wurden Ende der 1990er Jahre umstrukturiert und Expertise, Beteiligungen und Lagerstätten veräußert. Die Preussag AG war ursprünglich ein Bergbau-, Hütten- und Rohstoffkonzern (Preußische Bergwerks- und Hütten-Aktiengesellschaft) mit Aktivitäten in Bergbau (Kohle, Erze, Kali u.a.), Stahlproduktion, Metallverarbeitung und -handel, Energie und Anlagenbau. Sie wurde zwischen 1997 und 2004 umstrukturiert und 2002 in TUI AG umbenannt. Die Metallgesellschaft AG gehörte zu den bedeutendsten deutschen Rohstoff- und Metallkonzernen und war international tätig in Bergbau, Metallhandel, Nichteisenmetallurgie und anderen Sektoren. Sie wurde nach einer schweren Unternehmenskrise 1993 infolge hoher Verluste im Energiehandel zum Maschinen- und Anlagenbau umstrukturiert und ging 2005 in der GEA Group AG auf. Ohne große, international operierende Rohstoffunternehmen sind die Möglichkeiten zur Entwicklung eigener Rohstoffstrategien, neuer Technologien und langfristiger Partnerschaften mit rohstoffreichen Ländern eingeschränkt.

Die Verarbeitung und Veredelung durch energieintensive Verhüttung und Raffination nimmt aufgrund hoher Energiekosten und regulatorischer Anforderungen in Deutschland weiter ab (Hilgers 2025). Damit wird auch der Zugriff auf strategische Rohstoffe, die als Beiprodukt der

Verhüttung und Raffination gewonnen werden können, beschränkt. Die Produktion für die global wachsende Nachfrage wird ins außereuropäische Ausland verlagert, da die globale Nachfrage weiter steigt.

Auch die konventionelle Verarbeitung und Veredelung von Erdöl für die Herstellung von Energieträgern (Kraft- und Brennstoffe) sowie petrochemischen Grundstoffen führt in Europa und Deutschland unter den politischen Randbedingungen zu Stilllegungen sowie Umstrukturierungen zu biobasierten Energieträgern. Dies betrifft auch die Herstellung von Basischemikalien (vor allem aus Erdöl) und Düngemitteln (vor allem aus Erdgas). Gleichzeitig wächst die globale Nachfrage nach petrochemischen Erzeugnissen und ein Großteil der weltweit neu errichteten Raffinerie- und Petrochemiekapazitäten entsteht außerhalb Europas, insbesondere in Asien und im Nahen Osten.

Die energieintensive Raffination von Metallen und Erdöl wird in Deutschland und Europa durch hohe Energiekosten und steigende CO₂-Kosten, verschärfte regulatorische Anforderungen der EU und Deutschlands sowie eine geringere industrielle Nachfrage beschränkt. Ob das Risiko einer industriellen Standortverlagerung (sog. Carbon-Leakage-Effekt) durch technologische Entwicklungen und handelspolitische Maßnahmen wie dem Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) vermieden werden kann, wird diskutiert. Die Wettbewerbsfähigkeit europäischer und deutscher Standorte sowie die relative Bedeutung Europas als Produktionsstandort für metallurgische und petrochemische Vorprodukte nehmen jedoch weiter ab.

Erschwerte Investitionsbedingungen für energie- und CO₂-intensive Industrien in Deutschland und Europa durch hohe Energiekosten, steigende CO₂-Kosten im Rahmen des Europäischen Emissionshandelsystems (Emissions Trading Systems ETS), hohe ESG-Kriterien (Environment, Social, Governance) der Kapitalgeber sowie regulatorische Vorgaben der EU wie der Richtlinie RED III (Renewable Energy Directive III) oder EU Fit for 55 (Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% relativ zu 1990) erhöhen die Anforderungen für energie- und CO₂-intensive heimische Wertschöpfungsketten.

Wenn Expertise und Prozessschritte außerhalb Europas stattfinden, wächst die Abhängigkeit von internationalen Lieferketten und reduziert geostrategische sowie sicherheitspolitische Handlungsspielräume. In einer Krise kann nicht davon ausgegangen werden, dass Lieferketten stabil bleiben (Ölmez & Hilgers 2026). Neben umwelt- und industriepolitischen Aspekten sollten auch geostrategische und sicherheits-

politische Aspekte berücksichtigt werden. In einer Krise sind nicht notwendigerweise die sog. kritischen oder strategischen Rohstoffe der EU oder der Nationalstaaten (s. CRMA), sondern die zu dem Zeitpunkt nicht verfügbaren Rohstoffe entscheidend (Ölmez & Hilgers 2026).

In Großbritannien könnten neben industriepolitischen Aspekten auch Fragen der Versorgungssicherheit und strategischen Resilienz eine Rolle gespielt haben, da nach erheblichen wirtschaftlichen Schwierigkeiten und dem Konflikt mit dem chinesischen Eigentümer Jingye Group die British Steel 2026 durch die britische Regierung verstaatlicht wurde.

Für eine exportorientierte Industrienation wie Deutschland stellt sich die Frage, ob und welche industriellen Kernkompetenzen aus industriepolitischer, geopolitischer und sicherheitspolitischer Perspektive langfristig erhalten werden sollten und welche Rahmenbedingungen für aus Deutschland international agierende Rohstoffunternehmen erforderlich wären.

Ein hoher Anteil des Verarbeitenden Gewerbes am BIP erlaubt die vertikale Integration von Metallverarbeitung, -Raffination und Verhüttung für Primär- und Sekundärrohstoffe, einen international operierenden Bergbau auf Rohstoffe und damit sichere Lieferketten von Rohstoffen. Eine hinreichend große industrielle Nachfrage kann Produktionskapazitäten, technologische Kompetenzen und Lieferketten aufrechterhalten, die auch für den Verteidigungssektor von Bedeutung sind. Der US Inflation Reduction Act führte zur Ansiedlung des Verarbeitenden Gewerbes in den USA und damit auch die nachfolgenden Rohstofflieferketten (Clarke 2026, Heydari et al. 2025). Weitere Maßnahmen der USA wie finanzielle Beteiligungen und Abnahmegarantien bei Rohstoffgewinnung, -aufbereitung und -verarbeitung sollen zur Erhöhung der US-amerikanischen Rohstoffresilienz beitragen (Hilgers et al. 2021, Yildirim Ayyildiz et al. 2026).

Eine Auflistung kritischer und strategischer Rohstoffe im EU Critical Raw Materials Act (CRMA) allein dürfte nicht ausreichen, um die Rohstoffversorgung langfristig abzusichern. Studien weisen darauf hin, dass die Resilienz von Rohstofflieferketten nicht nur von der Verfügbarkeit einzelner Rohstoffe, sondern auch von leistungsfähigen Verhüttungs-, Raffinations- und Verarbeitungskapazitäten sowie einem wettbewerbsfähigen Verarbeitenden Gewerbe abhängt. Der Rückgang dieser industriellen Wertschöpfungsketten wird als ein wesentlicher Faktor für die Verwundbarkeit der G7-Staaten betrachtet (Clarke 2026; Heydari et al. 2025; Hilgers 2025).

Neben wettbewerbsfähigen Energiekosten, verlässlichen regulatorischen Rahmenbedingungen und dem Zugang zu Kapital sind für eine Rohstoffversorgung der Zugang zu internationalen Märkten, die Absicherung von Lieferketten, das Management geopolitischer Risiken sowie eine leistungsfähige Infrastruktur relevant.

Die Wertschöpfungsketten unterliegen zunehmend geopolitischen Spannungen, Exportbeschränkungen und staatlichen Industriepolitiken. Gleichzeitig stehen Unternehmen im globalen Wettbewerb mit Produzenten aus Ländern mit niedrigeren Energie-, Umwelt- und Arbeitskosten. Hohe Energiekosten, langwierige Genehmigungsverfahren und regulatorische Unsicherheiten beeinträchtigen die internationale Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Veredelungs- und Raffinationsschritte. Dadurch besteht die Gefahr, dass strategisch wichtige Kompetenzen in der Verarbeitung kritischer Rohstoffe weiterhin in andere Weltregionen verlagert werden. Dies betrifft insbesondere die Raffination und Weiterverarbeitung von kritischen und sicherheitsrelevanten Rohstoffen, da die Kontrolle über diese Prozessschritte zunehmend als wirtschafts- und sicherheitspolitischer Faktor betrachtet wird.

Die Rohstofffrage entwickelt sich damit nicht nur zu einem entscheidenden Faktor für die Geschwindigkeit und die wirtschaftlichen Kosten einer Transformation der Energiesysteme, sondern beeinflusst auch die Zukunftsfähigkeit einer wertschöpfungstiefen Industrie in Deutschland.

Große Investitionen von Industrienationen wie Japan, Südkorea und den USA zeigen, dass die Rohstoffsicherung staatliche Maßnahmen bedingen, die in konkreten Projekten und Rohstofflieferungen resultieren. Eine Kreislaufwirtschaft besitzt systemische und technische Grenzen und kann den Bedarf an Primärrohstoffen nur teilweise substituieren (Hilgers 2025, Heydari et al. 2025). Eine ausschließlich auf Kreislaufwirtschaft und Recycling beschränkte Rohstoffstrategie mit geringen Investitionen in Bergbau und Raffination primärer Rohstoffe könnte bei den langen Investitionszeiträumen nicht nur eine geostrategische, sondern auch industrie- und sicherheitspolitische Fehleinschätzung sein.

6 Schlussfolgerungen

Die Energiewende ist eng mit einer Rohstoffwende verbunden.

Klimaneutralität, Digitalisierung sowie Industrien und Dienstleistungen mit hoher Wertschöpfungstiefe werden den Rohstoffbedarf auf Jahrzehnte hinaus erhöhen. Damit rücken neben den sicherheitspolitischen Aspekten zunehmender Instabilitäten Fragen der Versorgungssicherheit,

der industriellen Wertschöpfung und der geopolitischen Abhängigkeiten in den Mittelpunkt.

Für Deutschland und Europa ergeben sich daraus mehrere Handlungsfelder: die Diversifizierung von Lieferketten, der Ausbau des national und international operierenden Bergbaus, des Recyclings, die Stärkung heimischer Verarbeitungskapazitäten, technologieoffene Innovationen sowie wettbewerbsfähige Energiepreise und Rahmenbedingungen für die Industrie. Obwohl diese Aspekte teilweise im Critical Raw Materials Act der Europäischen Union adressiert werden, verschiebt sich die Kompetenz von Bergbau und Raffination aus Europa in das außereuropäische Ausland.

Rohstoff- und Energiepolitik sind nicht mehr allein Umwelt- oder Wirtschaftspolitik, sie werden zunehmend zu Bestandteilen von Sicherheits-, Innovations- und Standortpolitik. Die entscheidende Aufgabe der kommenden Jahre wird darin bestehen, Klimaschutz, Wohlstand und Versorgungssicherheit, aber auch gesellschaftliche Stabilität und Krisenfestigkeit moderner Volkswirtschaften zu gewährleisten und tragfähige Kompromisse gleichermaßen zwischen den 17 Nachhaltigkeitszielen zu finden.

Bibliografie

- AGEB (2026a): *Bilanzen ab 1990*. https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-ab-1990/?_jahresbereich-bilanz=2021-2030 (07.08.2026).
- AGEB (2026b): *Preissensibilität prägt Energieverbrauch*. <https://ag-energiebilanzen.de/preissensibilitaet-praegt-energieverbrauch/> (07.08.2026).
- AGEB (2026c): *Struktur PEV ab 2003*. <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/struktur-des-primaeerenergieverbrauchs-in-deutschland/> (07.08.2026).
- Clarke, William (2026): „Defence metals: overturning the critical minerals myth“. *Mining Journal Whitepaper*. 15.
- Destatis (2026a): *Primary energy consumption by economic activities*. <https://www.destatis.de/EN/Themes/Society-Environment/Environment/Environmental-Economic-Accounting/energyflows-emissions/Tables/primary-energy-consumption.html> (07.08.2026)
- Destatis (2026b): *Gross domestic product in the 2nd quarter of 2026 up 0.2% on the previous quarter*.

- https://www.destatis.de/EN/Press/2026/07/PE26_269_811.html (07.08.2026).
- Destatis (2026c): *Bruttoinlandsprodukt*.
https://service.destatis.de/DE/vgr-monitor-deutschland/bip.html (07.08.2026).
- Destatis (2026d): *Reallöhne im Jahr 2025 um 1,9 % gestiegen*.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2026/02/PD26_068_62321.html (07.08.2026).
- Ehrlich, Paul R.; Holdren, John P. (1971): „Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive“. *Science* 171/3977, 1212 – 1217,
https://www.science.org/doi/10.1126/science.171.3977.1212
- EU (2024): „Regulation (EU) 2024/1252 of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials (Critical Raw Materials Act)“. *Official Journal of the European Union*, Document 32024R1252, https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng
- Fraunhofer (2025): *German Net Power Generation in 2024: Electricity Mix Cleaner than Ever*. https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2025/public-electricity-generation-2024-renewable-energies-cover-more-than-60-percent-of-german-electricity-consumption-for-the-first-time.html (07.08.2026).
- Haas, Willi; Krausmann, Fridolin; Wiedenhofer, Dominik; Heinz, Markus (2015): „How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005“. *Journal of Industrial Ecology* 19, 765-777. https://doi.org/10.1111/jiec.12244
- Heydari, Mehrnoosh; Mitchell, Philip; Cullen, Luke; Andrieu, Baptiste; Cabrera Serrenho, André; Cullen, Jonathan (2025): „A systematic review of resilience in the critical minerals supply chains, needed for the low-carbon energy transition“. *Renewable and Sustainable Energy Transition* 8, 100127,
https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100127
- Hilgers, Christoph (2025): „Rohstoffbedarf, Energie und Klima“. *Handbuch Rohstoffwirtschaft*, hrsg. von Walter Frenz. Berlin, Germany: Erich Schmidt Verlag, 55–110.
- Hilgers, Christoph; Kolb, Jochen; Becker, Ivy (2021): *Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient? Bergbau – Verhüttung – Recycling*. Karlsruhe:

- Thinktank Industrielle Ressourcenstrategien.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000124406>
- IEA (2022): *The role of critical minerals in clean energy transitions*.
<https://ica.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>
- IEA (2025): *Global critical minerals outlook 2025*.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ef5e9b70-3374-4caaba9d-19c72253bfc4/GlobalCriticalMineralsOutlook2025.pdf>
- OECD (2019): *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. Paris: OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph (2023): *Rohstoffe für Deutschland und Auswirkungen des Russland-Ukraine Konflikts*. Stuttgart: Thinktank Industrielle Ressourcen Strategien. 55. <https://doi.org/10.5445/IR/1000166052>
- Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph (2024): *Resiliente Rohstoffversorgung Deutschlands – Bergbaupotentiale in ausgewählten Ländern Afrikas und die Rolle Chinas*. Stuttgart: Thinktank Industrielle Ressourcen Strategien. 49. <https://doi.org/10.5445/IR/1000168179>
- Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph (2026): *Gewinnung Heimischer Strategischer Rohstoffe Im Krisenfall*. Baden-Baden: Thinktank Industrielle Ressourcenstrategien. 79.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000193074>.
- Our World in Data (2021): *Share of population living in extreme poverty – World, 1820 to 2018*. <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-population-living-in-extreme-poverty-historical> (07.08.2026).
- Our World in Data (2025a): *Share of primary energy consumption from fossil fuels*. https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuels-share-energy?tab=line&country=USA~JPN~CAN~FRA~ITA~DEU~GBR~OWID_WRL (07.08.2026).
- Our World in Data (2025b): *CO₂ emissions per capita*.
<https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita> (07.08.2026).
- Our World in Data (2026a): *Gas production 1900 to 2025*.
https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuels?tab=line&fuel=gas&metric=production&per_capita=total.

- Our World in Data (2026b): *Oil production 1900 to 2025*.
https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuels?tab=line&fuel=oil&metric=production&per_capita=total.
- Our World in Data (2026c): *Coal production 1800 to 2025*.
https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuels?tab=line&fuel=coal&metric=production&per_capita=total.
- UNEP (2024): „Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes“. *United Nations Environment Programme*.
<https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024>.
- United Nations (2024). „World Population Prospects 2024: Summary of Results“. *UN DESA/POP/2024/TR/NO 9*. New York: United Nations.
- United Nations (2025): *Urban population (% of total population) – Germany*.
<https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=DE>. (07.08.2026)
- United Nations (n.d.): *The 17 Goals*. <https://sdgs.un.org/goals>. (07.08.2026)
- VCI (2026): *Aktuelle Zahlen zur Konjunktur der chemisch-pharmazeutischen Industrie Chemie-Barometer*. <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/chemiebarometer-2.pdf> (07.08.2026).
- VDA (2025): *Passenger car market in Germany 2024: Electric production at a new record – massive drop in new electric vehicle registrations*.
https://www.vda.de/en/press/press-releases/2025/250106_production_and_market_in_germany_deceember_2024 (07.08.2026).
- WorldBank (2026a): *GDP per capita, PPP (current international \$)*.
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD> (07.08.2026).
- WorldBank (2026b): *Life expectancy at birth, total (years)*.
<https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN> (07.08.2026).
- WorldBank (2026c): *Current health expenditure per capita, PPP (current international \$)*.
<https://data.worldbank.org/indicator/SH.XPD.CHEX.PP.CD> (07.08.2026).
- WorldBank (2026d): *Manufacturing, value added (% of GDP) – Germany*.
<https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?locations=DE> (07.08.2026).

Yildirim Ayyildiz, Melike; Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph
(2026): „Probability Assessment of Strategic and Total Rare Earth
Element Supply for the EU Under the EU Critical Raw Materials
Act“. *Resources* 15/6, 73.
<https://doi.org/10.3390/resources15060073>

Energetische Verwertung als Baustein einer nachhaltigen Abfallwirtschaft

Christina Labusch

(REMONDIS, Lünen)¹

Abstract

The article provides an insight into waste-to-energy recovery at REMONDIS, which operates, among other facilities, 21 thermal waste treatment plants and 10 refuse-derived fuel (RDF) production plants worldwide. It begins with an overview of the company's business activities before positioning energy recovery within the current waste hierarchy. Unlike many other European countries, Germany has prohibited the landfilling of high-calorific-value waste since 2005. To prevent such waste from being disposed of in landfills, energy recovery has increasingly become a key element of sustainable waste management over the past 20 years. The article demonstrates how valuable natural resources can be conserved when residual materials can no longer be recycled through conventional material recovery processes. The various forms of thermal recovery and pyrolysis are introduced and illustrated through two practical examples. Particular attention is given to the generation of district heating and electricity for municipalities and households. Following the Heat Planning Act adopted in 2023, the decarbonization of heating networks is also to be further advanced by 2045. In an excursus on the production of refuse-derived fuels, their role in the decarbonization of industry is highlighted. Finally, the article provides an outlook on the current discussion surrounding the draft amendment to the German Circular Economy Act, which for the first time incorporates energy-intensive chemical recycling into the waste hierarchy.

¹ REMONDIS Sustainable Services GmbH – Brunnenstraße 138, 44536 Lünen

Resümee

Der Beitrag gibt einen Einblick in die energetische Verwertung von Abfällen bei REMONDIS mit weltweit unter anderem 21 Thermischen Abfallbehandlungsanlagen sowie 10 Ersatzbrennstoffproduktionsanlagen. Zunächst wird eine Übersicht über die Tätigkeitsfelder des Unternehmens gegeben, bevor die energetische Verwertung in der geltenden Abfallhierarchie verortet wird. Im Unterschied zu anderen europäischen Ländern besteht in Deutschland seit 2005 ein Deponierungsverbot für heizwertreiche Abfälle. Um deren Deponierung zu verhindern, rückte in den vergangenen 20 Jahren zunehmend die energetische Verwertung von Abfällen in den Fokus einer nachhaltigen Abfallwirtschaft. Es wird aufgezeigt, wie wertvolle Ressourcen geschont werden, weil Reststoffe oft nicht mehr stofflich verwertet werden können. Die verschiedenen Bereiche der thermischen Verwertung und einer Pyrolyse werden benannt und anhand zweier exemplarischer Beispiele beleuchtet. Insbesondere auf die Erzeugung von Fernwärme und Strom für Kommunen und Haushalte wird eingegangen. Nach dem 2023 beschlossenen Wärmeplanungsgesetz soll Dekarbonisierung des Wärmenetzes bis 2045 ebenfalls vorangetrieben werden. In einem Exkurs zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen wird deren Rolle zur Dekarbonisierung der Industrie unterstrichen. Abschließend wird noch ein Ausblick auf die aktuelle Diskussion um den Referentenentwurf des Kreislaufwirtschaftsgesetzes gegeben, der erstmals energieintensives chemisches Recycling in die Abfallhierarchie aufnimmt.

Keywords/Schlüsselwörter

Energy recovery, thermal waste treatment, waste hierarchy, resource conservation, district heating, electricity generation, decarbonization, heat planning act, municipal heat planning, substitute fuels

Energetische Verwertung, Thermische Abfallbehandlung, Abfallhierarchie, Ressourcenschonung, Fernwärme, Stromerzeugung, Dekarbonisierung, Wärmeplanungsgesetz, Kommunale Wärmeplanung, Ersatzbrennstoffe (EBS)

1 Einleitung

REMONDIS mit Sitz in Lünen gehört der RETHMANN-Gruppe an und ist eines der weltweit führenden Privatunternehmen für Recycling, Service und Wasser und erbringt Dienstleistungen für rund 30 Millionen Menschen. Über Niederlassungen und Anteile an Unternehmen ist

REMONDIS in über 30 Ländern auf drei Kontinenten präsent. Das 1934 gegründete Familienunternehmen erwirtschaftet mit mehr als 46.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern einen Jahresumsatz von 13,4 Milliarden Euro (2025). REMONDIS leistet über viele Geschäftsbereiche hinweg einen wesentlichen Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz. Angefangen bei der Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe aus Industrie- und Haushaltsabfällen, über die Herstellung hochwertiger Recyclingrohstoffe bis hin zur Umwandlung nicht recyclingfähiger Reststoffe in Kraftstoffe. Nicht zuletzt trägt das Unternehmen durch den Einsatz von Biomasse als Energieträger zunehmend auch zur Energiewende bei. Dabei sieht sich REMONDIS weltweit als Ansprechpartner und Berater für Industrie, Handel und Kommunen, um auch regionale und individuelle Lösungen zu finden.

Die REMONDIS-Gruppe erbringt Leistungen in den folgenden drei Geschäftsfeldern:

- **Recycling:** Erfassung, Logistik, Behandlung, Verwertung, Gewinnung von Recyclingrohstoffen und Energie sowie die Vermarktung von Produkten
- **Service:** Industrieservices, wie z. B. Gerüstbau, Industriereinigung, Sanierungsservices, Public Services, wie z. B. Städtereinigung und den Betrieb von Wertstoff- und Recyclinghöfen
- **Wasser:** Wasserversorgung, Abwassermanagement, Industrielles Wassermanagement, Klärschlammverwertung, Energie- und Wertstoffrückgewinnung, Digitale Lösungen, Services

Im Geschäftsfeld Recycling werden die Stoffströme Altglas, Altholz, Altkunststoff, Altpapier, Batterien, Bauschutt/Gipskartonplatten, Bioabfall, Chemiegips, Elektroaltgeräte, Elektronikaltgeräte, Fotochemikalien, Gefährliche Abfälle, Laugen, Leichtverpackungen, Metallschlacken, Metallschrott, MVA-Schlacken, REA-Gips, Restabfall (die aufgeführten Stoffgruppen stellen nur einen Auszug dar) verwertet.

Daraus werden die Produkte Calciumsulfat-Bindemittel, Düngemittel, Edelmetall, Edelstahl, Eisen, Energie, Glas, Holz, Komposte, Kunststoff, Kunststoffgranulate, Lösemittel, Metallsalze, NE-Metalle, Papier, Quecksilber, Recyclingbaustoffe, RC-Gipse, Sekundärbrennstoffe, Stahl, Substrate (die aufgeführten Produkte stellen nur einen Auszug dar) hergestellt und vermarktet.

In der Abfallrahmenrichtlinie und dem Kreislaufwirtschaftsgesetz werden die fünf Stufen der Abfallhierarchie definiert. REMONDIS sowie deren Töchterunternehmen sind, wie aus Abbildung 1 ersichtlich, in den letzten vier Stufen der Abfallhierarchie (Wiederverwendung, Recycling, Verwertung und Beseitigung) tätig.



Abb. 1: Thermische/energetische Verwertung als Bestandteil der Abfallhierarchie (Quelle: REMONDIS).

Die oberen Stufen der Abfallhierarchie sind auszuschöpfen, bevor eine Verwertung oder Beseitigung von Abfällen erfolgt. Da aber nicht alle Stoffströme stofflich verwertet werden können, erfolgt die thermische Behandlung von brennbaren, nicht-recyclingfähigen Abfällen. Aus Abfällen werden somit Strom, Fernwärme und Prozessdampf gewonnen. Damit werden fossile Energieträger wie Erdgas, Kohle oder Heizöl ersetzt (vgl. Prognos AG 2026). In der finalen Stufe der Abfallhierarchie erfolgt dann die Deponierung der verbleibenden Reststoffe. Die starke Verringerung der Deponierung von Siedlungsabfällen in Deutschland ist das Ergebnis eines konsequenten Zusammenspiels von Recycling, Vorbehandlung und thermischer Verwertung. Die gesetzliche Grundlage bilden die EU-Abfallrahmenrichtlinie und das Kreislaufwirtschaftsgesetz.

2 Energetische Verwertung in Deutschland und Aktivitäten von REMONDIS

Seit 2005 besteht in Deutschland im Unterschied zu anderen europäischen Ländern ein Deponierungsverbot für heizwertreiche Abfälle.

„Deponiegas besteht nach Angaben des Weltklimarates zu etwa 50 bis 60 Prozent aus Methan, zu 40 bis 45 Prozent aus CO₂. [...] Insbesondere der hohe Anteil an Methan im Deponiegas ist problematisch, denn Methan ist 28-mal klimaschädlicher als CO₂“. (ITAD 2024)

Zur Einordnung: Ungefähr ein Viertel der gesamten Methanemissionen Europas entfallen auf die Abfallwirtschaft, da in den meisten europäischen Mitgliedsstaaten noch immer im großen Maße deponiert wird. Um die Deponierung zu verhindern, rückte neben der Getrennterfassung von recyclebaren Abfällen und deren stofflichen Verwertung in den vergangenen 20 Jahren zunehmend die energetische Verwertung von Abfällen in den Fokus einer nachhaltigen Abfallwirtschaft in Deutschland.

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gab es 2024 insgesamt 164 thermische Abfallbehandlungsanlagen. Darunter fallen neben klassischen Müllverbrennungsanlagen auch weitere thermische Behandlungsanlagen für unterschiedliche Abfallarten. Zusätzlich wurden 454 Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen erfasst, beispielsweise Industrie- und Kraftwerksanlagen, die Abfälle oder Ersatzbrennstoffe mitverbrennen (vgl. DESTATIS 2024). „Waste-to-Energy schleust zudem Schadstoffe aus dem Kreislauf aus: Ohne eine sichere Behandlung schadstoffhaltiger Fraktionen wäre hochwertiges Recycling oft nicht möglich“ konstatiert die Studie von BCG und BDI und hält in einem eigenen Waste-to-Energy-Exkurs fest, dass die Integration von CCS- und CCUS-Technologien (Carbon Capture and Storage; Carbon Capture, Utilization and Storage) in WtE-Anlagen eine klimaneutrale Ausrichtung der Abfallwirtschaft bis 2045 ermöglichen würde (vgl. BCG/BDI 2026). Allerdings stellt die Studie auch dar, dass CCUS derzeit noch sehr energieintensiv seien, sodass der zusätzliche Eigenenergiebedarf die Netto-Stromerzeugung und insbesondere die Wärmeauskopplung in kommunale Fernwärmesysteme spürbar reduzieren könne (vgl. BCG/BDI 2026).

In Deutschland ist REMONDIS an mehreren Anlagen zur thermischen Verwertung von Haus- und Gewerbeabfällen beteiligt. Dazu zählen die Müllverbrennung Kiel (MV Kiel), die GAB in Tornesch, die BEG in Bremerhaven, die Gemeinschafts-Müllverbrennungsanlage Oberhausen (GMVA), die AVG Köln, das Müllheizkraftwerk Frankfurt (FES), die Entsorgungsgesellschaft Mainz (EGM), die RETA in Staßfurt, die HUI in Hagen sowie die MVA Hamm.

Für die thermische Behandlung von Sonderabfällen und medizinischen Abfällen stehen die Anlagen SAVA Brunsbüttel, TRV Wesseling, HTVA

Bramsche und HIM Biebesheim zur Verfügung. Im Bereich der energetischen Verwertung biogener Reststoffe betreibt REMONDIS das Biomassekraftwerk Lünen (BMK), die Biomasseverwertungsanlage Hagen-Kabel (BVA) sowie die Coesfeld-Pyrolyx-Anlage. Darüber hinaus werden Ersatzbrennstoffe in der WBF Lünen thermisch verwertet, Klärschlämme in der WFA Elverlingsen behandelt und mit der Alunova-Anlage in Bad Säckingen eine Pyrolyseanlage betrieben.

2.1 REMONDIS-Beteiligung an öffentlich-privaten Partnerschaften

REMONDIS ist über sogenannte Öffentlich-Private Partnerschaften an Gemeinschaftsunternehmen von Kommunen und der Privatwirtschaft beteiligt (vgl. Schäfer 2020). Exemplarisch wird nachfolgend vor allem auf die Gemeinschafts-Müll-Verbrennungsanlage in Oberhausen eingegangen. Die Gemeinschafts-Müll-Verbrennungsanlage Niederrhein (GMVA) in Oberhausen verarbeitet als Öffentlich-Private Partnerschaft der Städte Duisburg (Wirtschaftsbetriebe Duisburg 35,82 %) und Oberhausen (STOAG 15,18 %) sowie von REMONDIS (49 %) jährlich bis zu 720.000 Tonnen kommunaler und gewerblicher Abfälle. Diese Abfälle werden zugleich in Strom und Fernwärme umgewandelt. Herzstück der Anlage sind vier Verbrennungslinien mit moderner Energie- und Rauchgasreinigungstechnik, die eine sichere Entsorgung nicht mehr stofflich verwertbarer Abfälle ermöglichen und dabei die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte deutlich unterschreiten. Durch die Nutzung des im Abfall enthaltenen Energiepotenzials speist die GMVA jährlich erhebliche Mengen Strom und Wärme in die regionale Versorgung ein, wobei rund 50 Prozent des eingesetzten Abfallmixes biogenen Ursprungs sind. Ergänzend tragen digitale Überwachungssysteme zur Effizienzsteigerung des Anlagenbetriebs bei. Nachhaltigkeitsmaßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen, Regenwassermanagement sowie Artenschutzprojekte unterstreichen den Anspruch, ökologische Verantwortung mit industrieller Infrastruktur zu verbinden.

Die GMVA zeigt damit, wie moderne Waste-to-Energy-Anlagen Entsorgungssicherheit, Ressourceneffizienz und regionale Energieversorgung miteinander verknüpfen können (vgl. GMVA Niederrhein 2026). Die GMVA speist jährlich zwischen 315.000 bis 340.000 MWh Strom sowie 50.000 bis 150.000 MWh Fernwärme in die regionale Infrastruktur ein. Dadurch konnten fast 100.000 Haushalte in Oberhausen mit Strom

versorgt werden und durch die Wärme ca. 16,7 Millionen Liter Heizöl eingespart werden (Abbildung 2). Für die 50 Prozent biogener Anteil des eingesetzten Abfallgemisches erhält die Anlage Herkunftsnachweise nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), wodurch ein erheblicher Teil der Stromproduktion als erneuerbar eingestuft werden kann. Zusätzlich plant die GMVA die Erweiterung der bestehenden Fernwärmeauskopplung gemeinsam mit dem städtischen Energieversorger EVO.

Beteiligung an der GMVA Oberhausen

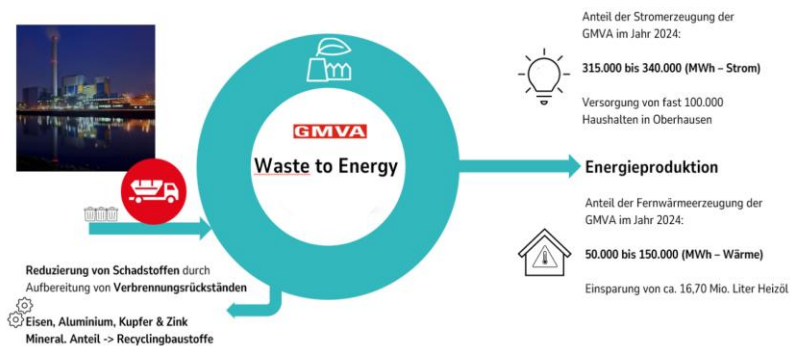


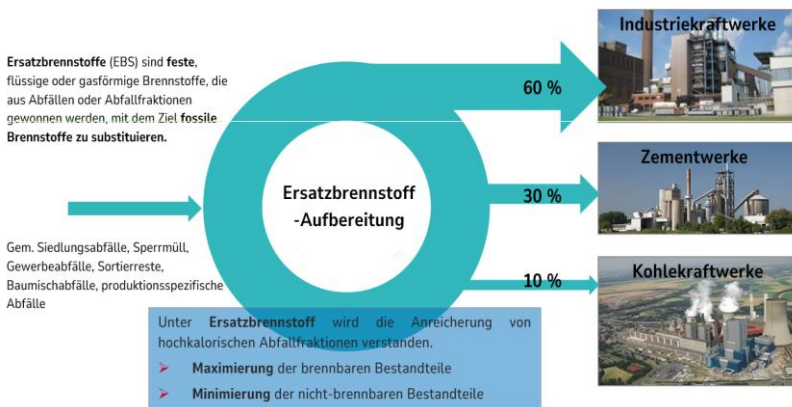
Abb. 2: Thermische Verwertung in der GMVA in Oberhausen (Quelle: REMONDIS).

2.2 Ersatzbrennstoffe für die Dekarbonisierung der Industrie

Für den industriellen Einsatz werden aus unterschiedlichen Abfallströmen, darunter gemischte Siedlungsabfälle, Sperrmüll, Gewerbeabfälle, Sortierreste, Baumischabfälle und produktionsspezifische Abfälle, sogenannte Ersatzbrennstoffe (EBS) hergestellt. Zwischen Ersatzbrennstoffen (EBS) und Sekundärbrennstoffen (SBS) ist eine begriffliche und qualitative Abgrenzung vorzunehmen. Während EBS als Oberbegriff für aufbereitete Abfallbrennstoffe verwendet wird und häufig mittelkalorische Brennstoffe mit Heizwerten von etwa 13 bis 15 MJ/kg umfasst, zeichnen sich SBS durch eine höhere und stärker definierte Brennstoffqualität aus. Aufgrund ihrer höheren Heizwerte eignen sich Sekundärbrennstoffe insbesondere zum Ersatz fossiler Energieträger wie Braunkohle, deren Heizwert typischerweise zwischen 20 und 22 MJ/kg liegt. Die Herstellung von EBS erfolgt durch eine mindestens

einstufige Aufbereitung von Abfällen, um die Brennstoffeigenschaften für die energetische Verwertung zu verbessern. Entsprechend kommen EBS unter anderem in Ersatzbrennstoffkraftwerken zum Einsatz, die als spezialisierte Anlagen zur thermischen Verwertung aufbereiteter Abfälle betrieben werden. Ziel der Aufbereitung ist die Anreicherung hochkalorischer und damit energetisch nutzbarer Fraktionen bei gleichzeitiger Reduzierung nicht brennbarer Bestandteile. Die erzeugten Ersatzbrennstoffe dienen als Alternative zu fossilen Energieträgern und werden vor allem in Industriekraftwerken (ca. 60 %) Zementwerken (ca. 30 %) sowie in geringerem Umfang in Kohlekraftwerken (ca. 10 %) eingesetzt. Die Nutzung in Kohlekraftwerken wird mit dem geplanten Kohleausstieg bis spätestens 2038 entfallen. Dennoch leisten Ersatzbrennstoffe einen Beitrag zur Ressourceneffizienz und zur Verringerung des Einsatzes primärer fossiler Brennstoffe in energieintensiven Industrieprozessen. Abbildung 3 zeigt die Ersatzbrennstoffaufbereitung bei REMONDIS.

Abb. 3: Schaubild Ersatzbrennstoffaufbereitung bei REMONDIS (Quelle:



REMONDIS).

2.3 Biomassekraftwerk Lünen im Rahmen der Kommunalen Wärmeplanung

Das Wärmeplanungsgesetz (WPG) ist der zentrale Baustein der deutschen Wärmewende. Bis spätestens 2045 soll demnach eine klimaneutrale Wärmeversorgung erreicht werden. Es verpflichtet Kommunen zur Erstellung kommunaler Wärmepläne, die den aktuellen Wärme-

bedarf, die bestehende Energieinfrastruktur sowie geeignete Versorgungsgebiete für den Ausbau von Fernwärmenetzen und dezentrale Lösungen wie Wärmepumpen analysieren. Darüber hinaus müssen Potenziale erneuerbarer Energien sowie nutzbarer Abwärmequellen systematisch erfasst werden. Die gesetzlichen Fristen sehen vor, dass Großstädte mit mehr als 100.000 Einwohnern ihre Wärmeplanung bis 2026 und kleinere Kommunen bis 2028 abschließen (vgl. WPG 2023). Durch die strategische Planung schafft das Gesetz Planungs- und Investitionssicherheit für Bürgerinnen und Bürger, Kommunen sowie Energieversorger. Gleichzeitig fördert es die Nutzung erneuerbarer Wärmequellen, die Integration industrieller Abwärme und die Dekarbonisierung bestehender Fernwärmesysteme. Obwohl die Wärmepläne keine direkte Verpflichtung für einzelne Gebäudeeigentümer begründet, ist sie eine wichtige Orientierung für zukünftige Investitions- und Versorgungsentscheidungen. Sie unterstützt den langfristigen Umbau der Wärmeversorgung hin zu klimafreundlichen Strukturen.

Die Wärmewende in Lünen wird maßgeblich durch die Kooperation von Iqony Energies, REMONDIS und den Stadtwerken Lünen vorangetrieben. Im Rahmen einer Investition von rund 15 Millionen Euro wird das seit 2006 betriebene Biomassekraftwerk Lünen (BMK) bis 2028 um eine Wärmeauskopplung sowie ein zusätzliches Heizwerk erweitert. Dadurch sollen jährlich bis zu 90.000 MWh klimafreundliche Wärme bereitgestellt werden, was dem Wärmebedarf von etwa 16.500 Haushalten beziehungsweise mehr als 40 Prozent der Lünener Haushalte entspricht (Abbildung 4). Die erzeugte Wärme wird über einen neuen Heizkondensator in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Lünen eingespeist und ersetzt schrittweise bisherige fossil geprägte Wärmequellen. Das Projekt gilt als wichtiger Baustein der kommunalen Wärmeplanung und unterstützt die Dekarbonisierung der Fernwärmeversorgung deutlich vor dem bundesweiten Zieljahr 2045. Neben einer erheblichen Reduktion von Treibhausgasemissionen soll die Maßnahme langfristig die Versorgungssicherheit stärken und die Abhängigkeit von steigenden CO₂-Kosten verringern (vgl. Stadtwerke Lünen, 2025).

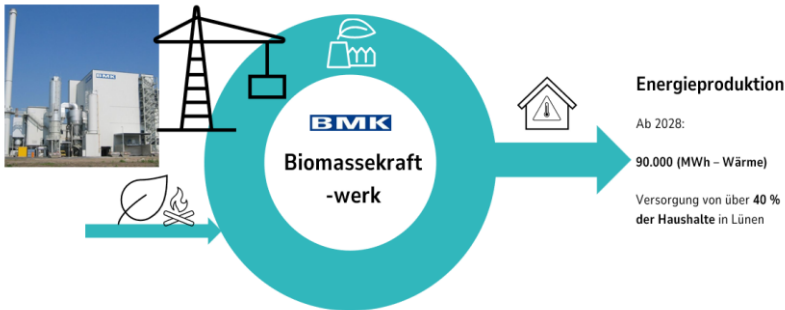


Abb. 4: Beitrag des Biomassekraftwerks zur Kommunalen Wärmeplanung Lünens (Quelle: REMONDIS).

3 Abfallhierarchie im Rahmen der Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes 2026

Der 2025 geschlossene Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD sieht vor, das chemische Recycling in die Abfallhierarchie aufzunehmen. Der 2026 vom Bundesumweltministerium veröffentlichte Referentenentwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) greift diese Vereinbarung auf, indem das werkstoffliche und chemische Recycling auf derselben Hierarchiestufe verortet wird. Chemisches Recycling wird darin wie folgt definiert:

„Chemisches Recyclingverfahren im Sinne dieses Gesetzes ist das Recycling von Kunststoffen durch Verfahren, bei denen Polymere ganz oder teilweise in ihre Bestandteile zerlegt und diese anschließend stofflich zur Erzeugung neuer Polymere oder anderer Stoffe verwendet und nicht energetisch genutzt werden“ (vgl. Referentenentwurf KrWG 2026).

Im Sinne der Abfallrahmenrichtlinie wird das chemische Recycling damit oberhalb der energetischen Verwertung eingeordnet. Die unterschiedlichen Verwertungsverfahren, insbesondere die Pyrolyse, sollten ökobilanziell auch mit der energetischen Verwertung ins Verhältnis gesetzt werden. Vor dem Hintergrund des § 8 KrWG erscheint es sinnvoll, denjenigen Verwertungsoptionen Vorrang einzuräumen, die unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus den größten ökologischen und ökonomischen Nutzen erzielen. Eine solche Betrachtung würde dazu beitragen, die jeweils nachhaltigste und ressourceneffizienteste Behandlungsoption zu identifizieren.

4 Fazit

Die energetische Verwertung ist ein unverzichtbarer Bestandteil einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Während Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling weiterhin Vorrang in der Abfallhierarchie genießen, bleiben erhebliche Stoffströme bestehen, die technisch, ökologisch oder wirtschaftlich nicht mehr stofflich verwertet werden können. Für diese Abfälle stellt die thermische Behandlung eine sichere und ressourcenschonende Verwertungsoption dar. Gleichzeitig leistet sie einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung, indem Strom, Prozessdampf und Fernwärme erzeugt und fossile Energieträger ersetzt werden.

Die im Beitrag dargestellten Beispiele der GMVA Oberhausen sowie des Biomassekraftwerks Lünen verdeutlichen, dass moderne Anlagen zur energetischen Verwertung weit über die reine Abfallbehandlung hinausgehen. Sie tragen zur regionalen Versorgungssicherheit bei, unterstützen die kommunale Wärmewende und leisten einen messbaren Beitrag zur Dekarbonisierung von Industrie und Wärmeversorgung. Auch Ersatzbrennstoffe gewinnen vor diesem Hintergrund als klimaschonende Alternative zu fossilen Energieträgern in energieintensiven Industriezweigen zunehmend an Bedeutung.

Die aktuelle Diskussion um die Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und die stärkere Berücksichtigung chemischer Recyclingverfahren zeigt zugleich, dass sich die Kreislaufwirtschaft in einem technologischen Wandel befindet. Künftig wird es entscheidend sein, unterschiedliche Verwertungswege nicht isoliert, sondern auf Grundlage einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung zu bewerten. Maßgeblich sollte dabei sein, welche Option den größten ökologischen und ökonomischen Nutzen erzielt und den wirksamsten Beitrag zu Ressourcen- und Klimaschutz leistet. Die energetische Verwertung wird dabei auch künftig eine wichtige Rolle als Bindeglied zwischen Kreislaufwirtschaft, Energieversorgung und Klimaschutz spielen.

Bibliographie

BCG/BDI (2026): „Wachstum, Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz.“ Berlin. Seite 100f. Verfügbar unter:
https://bdi.eu/media/pages/specials/industry-spotlight-circular-economy-studie/7c4e2cc5cf-1777457891/26-04-28-circular-economy_bcg-bdi_de_langversion-studie.pdf

- Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (2023): „Wärmeplanungsgesetz – WPG“. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/BJNR18A0B0023.html>
- GMVA Niederrhein (2026): „Wir brennen für die Zukunft“. Oberhausen. Seite 3. Verfügbar unter: https://www.gmva.de/website/images/2026/07/GMVA-Broschuere_210x280_2026_EmpCo_Final.pdf
- DESTATIS (2024): Abfallentsorgungsanlagen. Wiesbaden. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallentsorgungsanlagen.html>
- ITAD (2025): „Jahresbericht 2024-2025“. Berlin. Seite 8. Verfügbar unter: https://www.itad.de/fileadmin/Redaktion_ITAD/Publikationen/Jahresberichte/ITAD_Jahresbericht_2024-2025.pdf
- Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD (2025): „Verantwortung für Deutschland“. Seite 38. Berlin. Verfügbar unter: https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf
- Referentenentwurf Kreislaufwirtschaftsgesetz (2026): „KrWG“. Seite 6. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.bundesumweltministerium.de/gesetz/referentenentwurf-eines-gesetzes-zur-aenderung-des-kreislaufwirtschaftsgesetzes>
- Schäfer, Michael (2020): „Erfolgsfaktoren von ÖPP-Unternehmen in der kommunalen Daseinsvorsorge und eine Handreichung für die Implementierung solcher Kooperationen“. *Öffentlich-Private Partnerschaften*, hrsg. von Michael Schäfer / Ludger Rethmann. Ort: Wiesbaden, 313–351.
- Stadtwerke Lünen (2025): „Iqony, Remondis und Stadtwerke Lünen machen große Wärme-Investition“ Verfügbar unter: <https://www.stadtwerke-luenen.de/wir/presse/2025-11-18-iqony-remondis-und-stadtwerke-luenen-machen-grosse-waerme-investition>
- Prognos AG (2026): „Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2026“. Berlin. Seite 222. Verfügbar unter: https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2026/04/Statusbericht_2026_Einzelseiten_96ppi.pdf

Altmark Lithium Extraktion – Neuentwicklung einer lithiumhaltigen Solelagerstätte im Altmark-Gasfeld, Sachsen-Anhalt, Deutschland

***Axel A.O. Wenke, Johannes Böcker, Christoph Boermann,
Matthias Berling, Matthias Determann, Volker Köhler,
Katja Krause, Jakub Kokinda, Silvio Lehmann, Thomas
Mozer, Bianca D. Neumann, Folker Ruhe, Joachim Sluet,
Dominik Soyk, Kerstin Todte, & Maximilian Zindel
(Neptune Energy)***

Abstract

After an average lithium concentration of 375 mg/L had already been identified in associated brine co-produced with natural gas during the 1970s, the first Direct Lithium Extraction (DLE) facility was developed at the Steinitz gas operations site in the 1980s. The plant, based on a combination of liquid-liquid extraction and ion-exchange technologies, was close to commencing production in 1989/1990. However, dramatic political changes culminating in German reunification rendered the project unattractive for further development, as it was not yet economically competitive at the time. With a resource base of approximately 43 million tonnes of Lithium Carbonate Equivalent (LCE) within the Permian Rotliegend reservoir, as well as additional, still largely underexplored upside potential in the overlying Triassic Buntsandstein formation, the Altmark lithium brine field represents a world-class resource and can be classified as a giant field in oil and gas industry terminology. The resource is predominantly distributed across the Jeetze production licence and the three exploration licences Milde A, B, and C, covering an area of 3200 km². Owing to its location in the heart of the European Union and its proximity to major potential customers (within approximately 100–250 km), the project is particularly attractive for redevelopment due to both its scale and the high lithium content of the brine. The project has now reached the feasibility stage. A demonstration plant is planned for 2028/2029, while commercial production is targeted

to commence in 2030, with a nameplate production capacity of 25,000 tonnes of LCE per annum at full development.

Resümee

Nachdem bereits in den 1970er Jahren eine durchschnittliche Lithiumkonzentration von 375 mg/l in dem mit dem Erdgas koproduziertem Lagerstättenwasser nachgewiesen worden war, wurde in den 1980er Jahren am Gas-Betriebsstandort Steinitz die erste Anlage zur Direkten Lithiumextraktion (Direct Lithium Extraction, DLE) entwickelt. Die auf den Einsatz von Flüssig-Flüssig-Extraktion und Ionenaustauscherverfahren basierende Anlage stand 1989/1990 kurz vor der Produktionsaufnahme. Dramatische politische Veränderungen, die schließlich zur deutschen Wiedervereinigung führten, machten das damals wirtschaftlich noch nicht wettbewerbsfähige Projekt für die Weiterentwicklung uninteressant. Mit einer Ressourcengröße von ca. 43 Millionen Tonnen Lithiumcarbonat-Äquivalent (LCE) im permischen Rotliegend-Reservoir sowie möglicherweise zusätzlichem, bislang nur unzureichend erkundetem Potenzial im darüberliegenden triassischen Buntsandstein, stellt das Altmark-Lithiumsolefeld eine Lagerstätte von Weltklasse dar und kann in der Terminologie der Erdöl- und Erdgasindustrie als „Giant Field“ (Riesenlagerstätte) klassifiziert werden. Die Ressource verteilt sich über eine Gesamtfläche von 3200 km² auf die Förderlizenz Jeetze sowie die drei Explorationslizenzen Milde A, B und C. Durch die Lage im Herzen der Europäischen Union und die Nähe zu potenziellen Großabnehmern des Rohstoffs (100–250 km Entfernung) ist das Projekt aufgrund seiner Größe und des hohen Lithiumgehalts der Sole besonders attraktiv für eine Neuentwicklung. Das Projekt hat inzwischen die Machbarkeitsphase erreicht. Eine Demonstrationsanlage ist für 2028/2029 geplant, die Aufnahme einer kommerziellen Produktion mit einer Förderleistung im Endausbau von 25.000 Tonnen LCE pro Jahr soll 2030 beginnen.

Keywords/Schlüsselwörter

DLE, Direct Lithium Extraction, Rotliegend, Southern Permian Basin, Altmark

DLE, Direkte Lithiumextraktion, Rotliegend, Südliches Permbecken, Altmark

1 Einleitung

Mit einem ursprünglich in der Lagerstätte vorhandenen Gasvolumen (Gas Original In Place - GOIP) von 9,4 Billionen Kubikfuß (266 Mrd. m³; Rückheim et al., 2005) ist das Altmark-Gasfeld das zweitgrößte Erdgasfeld auf dem europäischen Festland und seit der Schließung des Feldes Groningen das größte sich noch in Produktion befindende.

Das Feld wurde 1968 entdeckt und bereits 1969 in Produktion genommen. Seitdem wurden mehr als 213 Milliarden Kubikmeter Erdgas gefördert. Im Zuge der Feldesentwicklung wurden insgesamt 466 Bohrungen niedergebracht, 370 davon als Produzenten.

Untersuchungen zum Phasenverhalten von Reservoirfluiden (PVT – Pressure, Volume, Temperature) und chemische Analysen von Wasserproben aus der Erkundungs- und Produktionsphase zeigten eine erhöhte Dichte der Altmark-Sole von bis zu 1,25 g/cm³. Der Hauptanteil der gelösten Stoffe besteht aus Salzen von Alkalimetallen und Erdalkalimetallen (NaCl, CaCl₂ und KCl). Bereits früh wurden jedoch auch erhöhte Konzentrationen von Rohstoffen festgestellt, die hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit als kritisch eingestuft werden, wie beispielsweise Lithium und Strontium.

Mit zunehmender Menge an Sole, die im Zuge der Gasförderung an die Oberfläche gelangte, entstand bereits in den 1970er Jahren die Idee, vor der Reinjektion Rohstoffe aus der Sole zu gewinnen. In den 1980er Jahren wurde schließlich eine erste Anlage zur Lithium-Rohstoffgewinnung mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion in Kombination mit Ionenaustauscherverfahren errichtet (Abb. 1). Es war vermutlich die erste DLE-Anlage Europas.

Der Fall des Eisernen Vorhangs, die deutsche Wiedervereinigung und das Fehlen eines geeigneten Absatzmarktes führten jedoch Anfang der 1990er Jahre zum Ende dieses ersten europäischen Lithium-aus-Sole-Projekts.



Abb. 1: Luftaufnahme der Anlage zur direkten Rohstoffextraktion (türkis markierter Bereich) am Betriebsstandort Steinitz bei Salzwedel. Das leicht modifizierte Foto stammt aus den frühen 1990er Jahren. Die Tanks vor dem Gebäude enthielten die für den Prozess erforderlichen organischen Lösungsmittel (Wenke et al. 2025).

Da das Altmark-Gasfeld mittlerweile einen Ausbeutegrad von über 80 % erreicht hat und sich die Gasproduktion in einer Spätphase befindet, stellt eine künftige Lithiumproduktion am bestehenden Standort ein hervorragendes Beispiel für einen sozial- und klimagerechten Strukturwandel („Just Transition“) dar. Gleichzeitig deutet die erwartete Entwicklung der Lithium-Nachfrage auf ein starkes wirtschaftliches Potenzial hin.

2 Die Lithiumlagerstätte Altmark

Das Altmark-Gasfeld befindet sich auf einer strukturellen Hochlage am südlichen Rand des intrakontinentalen „Südlichen Permbeckens“ („Southern Permian Basin“). Die ausgedehnte Domstruktur wird hauptsächlich durch WNW-OSO verlaufende Störungen segmentiert (Wenke et al. 2025, Abb. 2).

Die Hauptphase tektonischer Aktivität fand während des Unter- und Mittelperm (spätes Rotliegend) statt. Die strukturelle Entwicklung nach dem Jura ist vor allem mit Phasen der Beckeninversion und lokalen Salz- bewegungen verbunden (Doornenbal / Stevenson 2010).

Seit dem Neogen gilt die Altmarkregion als tektonisch inaktiv. Seit Produktionsbeginn im Jahr 1969 wurden keine natürlichen tektonischen Aktivitäten und lediglich sehr geringe induzierte Seismizität festgestellt.

Das Hauptreservoir des Gasfeldes entspricht zugleich einem der Reservoirs der lithiumhaltigen Sole unterhalb des Gas-Wasser-Kontakts. Es besteht aus klastischen Sedimentgesteinen des Oberen Rotliegend, vor allem äolischen Dünen- und Sandflachwasser-Fazies der Hannover- und Dethlingen-Formationen sowie der Havel-Untergruppe. Letztere ist im gasführenden Teil der Altmark nicht ausgebildet.

Trotz erhöhter Lagerstättentemperaturen konnten Chloritbeschichtungen in einigen Sandsteinschichten hohe Porositäten und Permeabilitäten erhalten.

Erhöhte Lithiumkonzentrationen in Solen der tektonostratigraphischen Einheit „Southern Permian Basin“ sind seit langem bekannt (Hoth et al. 1997; Lüders et al. 2010; Dugamin et al. 2023, Böcker 2025).

Ihre genaue Herkunft ist noch nicht vollständig geklärt, jedoch werden Phyllosilikate aus den vulkanischen Gesteinen des Unteren Rotliegend als primäre Lithiumquelle angesehen. Anreicherungsprozesse wie die Auflösung von Phyllosilikaten und Chloritisierungsprozesse im Zusammenhang mit der Auflösung klastischer Bestandteile deuten auf eine In-situ-Anreicherung im Rotliegend-Aquifer hin.

Da die Verdunstungsprozesse im Süd-Permischen Becken erst nach Ablagerung des Hauptreservoirs stattfanden, spricht dies gegen eine primäre evaporitische Herkunft des Lithiums.

Die Lithiumkonzentration im Rotliegend-Aquifer unterhalb der Gaszone liegt im Durchschnitt bei 441 mg/l (z. B. Boermann et al 2026).

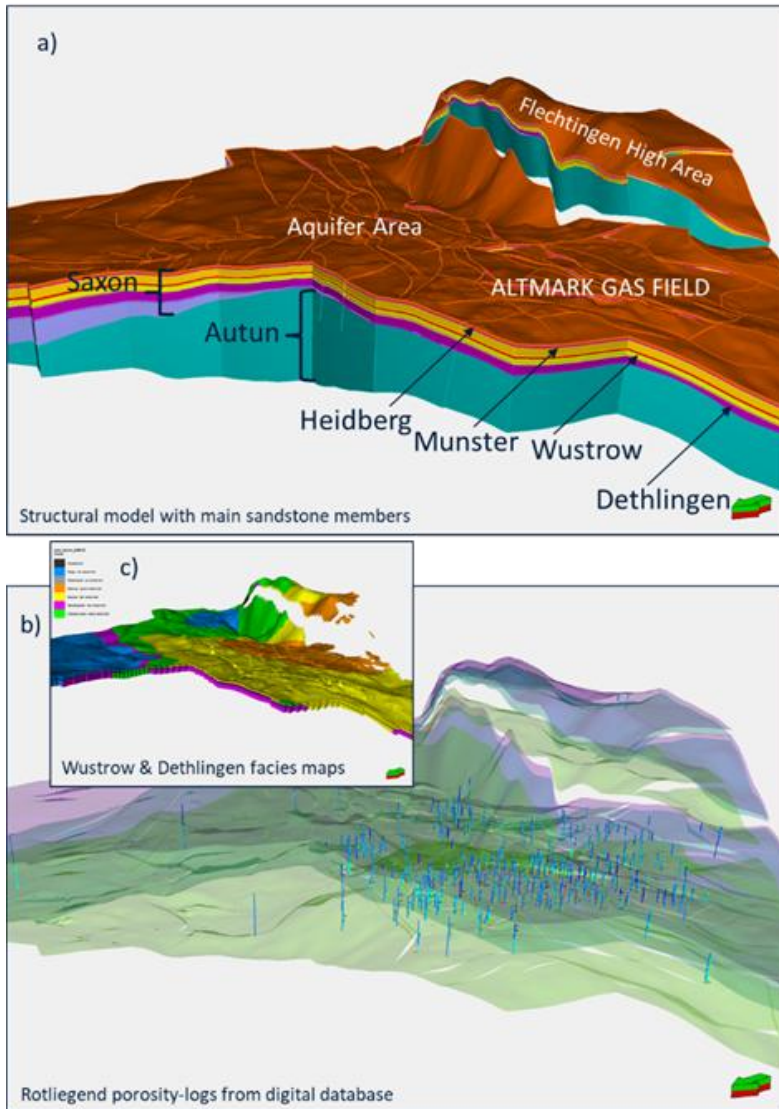


Abb. 2: Geologisches Modell des Altmark-Gasfeldes und des damit verbundenen lithiumreichen Aquifers: a) Strukturmodell des Hauptreservoirs in Sachsen-Anhalt und der darunterliegenden vulkanischen Gesteine des Autuniens, b) Verteilung der Bohrdaten, c) Fazieskarten der Wustrow- und Dethlingen-Formation.

3 Größe der Ressource

Die Ressourcenbewertung basiert auf folgenden Lizenzgebieten (Abb. 3):

- Förderlizenz Jeetze (ca. 1.800 km²)
- Explorationslizenzen Milde A, B und C (zusammen ca. 1.400 km²).

Obwohl die meisten Daten innerhalb der Gaslagerstätte erhoben wurden, wurde die lithiumhaltige Sole innerhalb der Gaszone bei der Ressourcenbewertung ausgeschlossen. Hintergrund ist eine spätere Produktion allein aus dem Soleleiter unterhalb des Gas-Wasser-Kontakts.

Wasserproben unterhalb der Gaszone wurden an acht Standorten entnommen. Obwohl Spitzenwerte von bis zu 638 mg/l Lithium gemessen wurden, sind Datenpunkte aus der Gaszone in die Bewertung einbezogen, um die weiträumige Verbreitung der Lithiumressource im permi-schen Aquifer zu bestätigen.

Die für die Volumenbetrachtung angenommene durchschnittliche Lithiumkonzentration von 375 mg/l schließt Daten aus dem Gasfeld mit ein. Dieser Wert wird als konservativ betrachtet und bietet Potenzial für zusätzliche Ressourcensteigerungen.

Für die Förderlizenz Jeetze wurden die ursprünglich vorhandenen Lithiumressourcen mit 2,6 Millionen Tonnen Lithium beziehungsweise 13,6 Millionen Tonnen LCE bewertet:

- Gemessen: 3,4 Mio. t LCE
- Angezeigt: 5,8 Mio. t LCE
- Abgeleitet: 4,5 Mio. t LCE

Für die Explorationslizenzen wurden inklusive der prospektiv-Ressourcen zusätzliche 29 Millionen Tonnen LCE bewertet:

- Gemessen & Angezeigt: 0,01 Mio. t LCE
- Abgeleitet: 0,29 Mio. t LCE
- Prospektiv: 28,76 Mio. t LCE

Darüber hinaus befindet sich in den Explorationslizenzen ein zusätzliches Ressourcenpotential von weiteren 6 Mio. t LCE. Die Gesamtgröße der Ressource kann daher auf 48,6 Mio t LCE geschätzt werden.

Mit einer Gesamtressource von 43 Mio. Tonnen LCE würde bereits eine Gewinnungsrate von nur 1,5 - 2 % ausreichen, um über 30 Jahre hinweg eine Produktion von 25.000 Tonnen LCE pro Jahr zu ermöglichen.

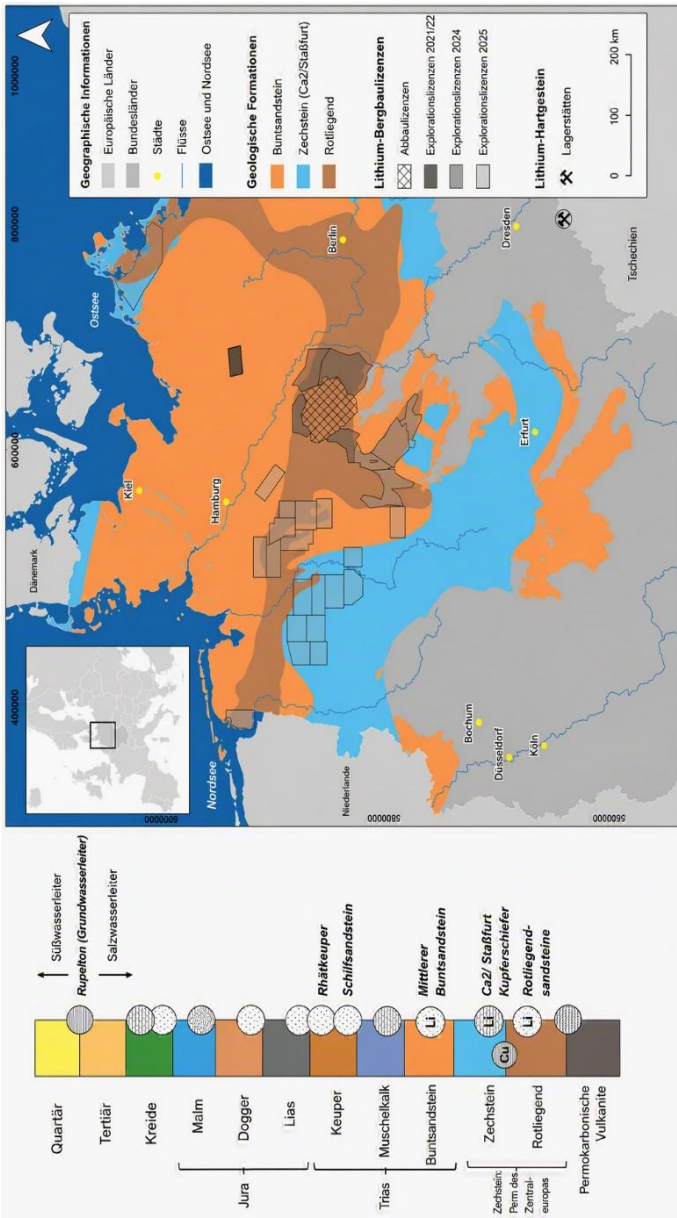


Abb. 3: Die Lage der Lithium Lizenzen Jeetze und Milde A, B & C. Farb markierte Flächen stellen geologische Formationen mit Lithiumhöflichkeit dar (z. B. Buntsandstein in Orange, Zechstein in Blau, Rotliegend in Braun). Zusätzlich werden Zonen dargestellt, die mit Lithium in Zusammenhang stehen: etwa Explorations- und Förderkonzentrationen oder Bohrungen. Nach Alms & Schinarakis (2026) und Alms et al. (2025).

4 Status der Feldesentwicklung

Die ursprüngliche Vorentwicklung der Altmark-Lithiumressource erfolgte parallel zur Erschließung des Gasfeldes. Mit zunehmendem Wasseranteil in der Gasförderung wurden die Solemengen immer bedeutender.

1988 erreichte die Soleförderung mehr als 500.000 m³ pro Jahr, nachdem bereits 1977 Spitzenwerte von 100.000 m³ pro Jahr erzielt worden waren. Dadurch wurde die Gewinnung von Lithium und anderen kritischen Rohstoffen aus der Produktionssole für die DDR interessant.

Die erste Explorationsphase einschließlich dem Abteufen von Explorationsbohrungen fand Anfang bis Mitte der 1970er Jahre statt. Die meisten Bewertungs- und Erkundungsbohrungen wurden bis Anfang der 1980er Jahre abgeschlossen.

Auch die erste Machbarkeitsbewertung erfolgte Anfang der 1980er Jahre in der DDR. Planung und Bau der Lithiumextraktionsanlage wurden in den späten 1980er Jahren umgesetzt. Die geplante Produktionsaufnahme fiel schließlich den politischen Umwälzungen rund um den Zusammenbruch des Ostblocks zum Opfer.

5 Erneute Feldesentwicklung

Die Wiederaufnahme des Projekts begann im Jahr 2022. Im ersten Quartal 2024 wurde der Zugang zur Lagerstätte durch die Erteilung der ersten deutschen Förderlizenz für Lithiumgewinnung aus Sole erfolgreich gesichert.

Die finale Revision einer Scoping-Studie wurde im dritten Quartal 2025 abgeschlossen und führte zu einer positiven Investitionsentscheidung für die frühe Projektentwicklungsphase.

Zwischen 2023 und 2024 wurden zwei erfolgreiche externe Pilotanlagen mit ionenaustauschbasierter DLE-Technologie betrieben. Im dritten Quartal 2024 begann die FEL-1-Phase (Pre-Feasibility).

Bei ersten Pilotversuchen am Standort wurden zwischen Q3/2024 und Q4/2025 sequentiell TiO₂- und MnO-Ionenaustausch-DLE-Technologien sowie ein Adsorptionsverfahren basierend auf Aluminiumtrihydroxid (ATH) durchgeführt. Dabei wurde phasenweise eine Produktionsrate von 0,67 Tonnen LCE pro Jahr erreicht. Ende des vierten Quartals 2024 konnte erstmals Lithiumcarbonat in Batteriequalität hergestellt werden. Ende 2025 stand ein ökonomisch und ökologisch belastbares Prozessschema zur Verfügung.

Die im Pilotbetrieb verwendete Sole stammt aus dem permischen Reservoir und wird derzeit bei der Erdgasproduktion mitgefördert.

Die weitere Projektplanung sieht vor (Abb. 4):

- Optimierung des aktuellen Extraktionsprozesses
- Ende 2026: Abschluss der Machbarkeitsstudie
- Ab Q2/2027: Akquisition neuer geophysikalischer Daten und Bohrung neuer Produktionsbohrungen für die Demonstrationsphase
- 2028: Produktionsstart einer DLE-Demonstrationsanlage
- 2030: Beginn einer kommerziellen Förderung mit 25.000 t LCE/Jahr im Endausbau

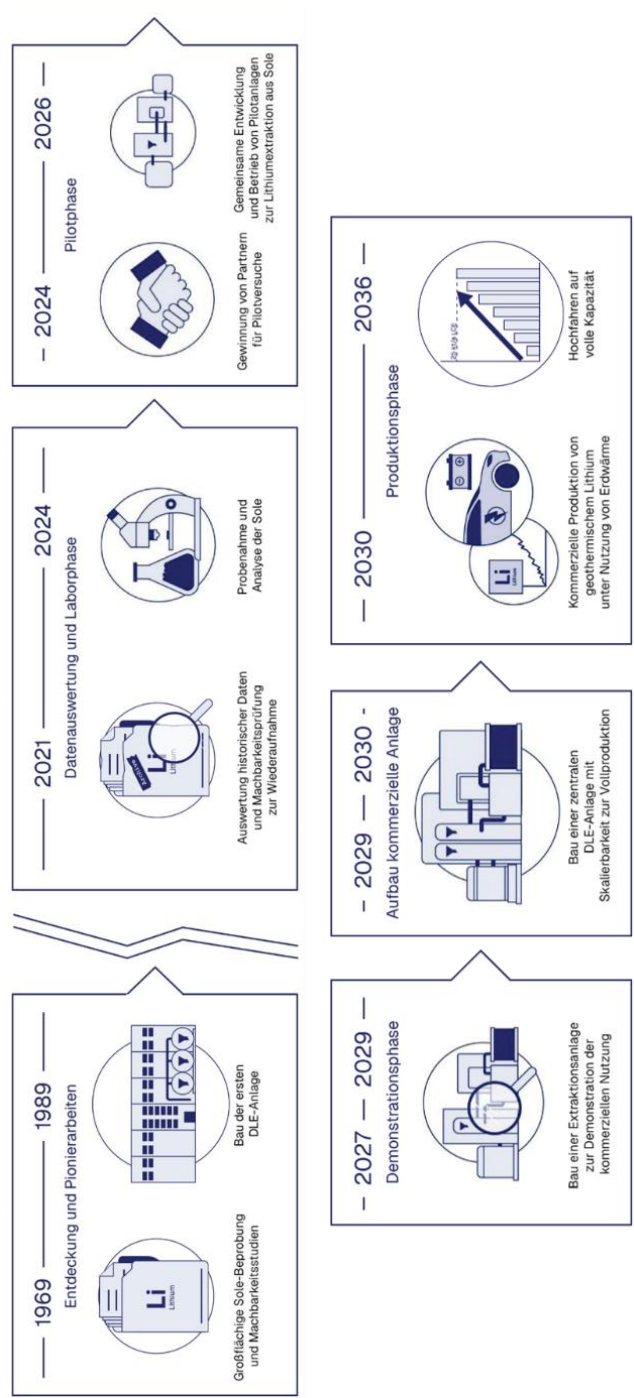


Abb. 4: Projektentwicklungsstufen des Altmark Lithium Extraction (ALE) Projektes bis zur Produktion im Jahr 2030 und der anschließenden Produktionssteigerung bis zur Mitte der Dekade.

6 Schlussfolgerungen

Das Projekt Altmark Lithium Extraction (ALE) stellt den zweiten Versuch dar, die Lithiumressource des Altmark-Gasfeldes zu erschließen – rund 30 Jahre nach dem Abbruch des ersten Projekts aufgrund der politischen Veränderungen der frühen 1990er Jahre und eines damals völlig anderen Marktumfelds.

Mit einem Ressourcenpotenzial von 40-50 Millionen Tonnen LCE im Untergrund und einer jährlichen Produktion von 25.000 t LCE könnte das Projekt über Jahrzehnte hinweg 15–40 % des deutschen Lithiumbedarfs nach 2030 (Steiger et al. 2022) decken und damit einen bedeutenden Beitrag zur europäischen Rohstoffsicherheit und Energiewende leisten.

Bibliographie

- Alms, Katharina; Heinelt, Manfred; Groeneweg Alicia (2025): *Lithium prospectivity and capacity assessment in Northern Germany*. Geothermics 127, 103207
- Alms, Katharina; Schinarakis Kosta (2026): „Fünf Faktoren für den Erfolg von heimischem Lithium aus Geothermie“. *Pressemitteilung des Fraunhofer IEG vom 16.07.2026*.
<https://www.ieg.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2026/heimisches-lithium-geothermie.html>
- Böcker, Johannes (2025): „Findings on the origin of lithium enrichment in brines in the Altmark gas field area, Germany“. *Proceedings*, 86th EAGE Annual, Toulouse.
- Boermann, Christoph; Böcker, Johannes; Determann, Matthias; Köhler, Volker; Lange, Christian; Lehmann, Silvio; Samiee, Ramin; Mozer, Thomas (2026): „Altmark Deep-Brine Lithium Project: Geoscience Perspective on Early Development“. *Proceedings*, 87th EAGE Annual Conference & Exhibition, Jun 2026, Volume 2026, 1 – 5, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2026101773>
- Doornenbal, Hans; Stevenson, Alan (2010): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*. EAGE, Houten.
- Dugamin, Elza J.M; Cathelineau, Michel; Boiron, Marie-Christine; Richard, Antonin; Despinois, Frank (2023): „Lithium enrichment processes in sedimentary formation waters“. *Chemical Geology* 635, 121626.

- Hoth, Peer; Seibt, Andrea; Kellner, Torsten (1997): „Chemische Charakterisierung der Thermalwässer“. *Hydrochemische Charakterisierung mesozoischer Tiefenwässer. Geothermie Report* 97/1, GFZ-Potsdam, 86 STR97/15.
- Lüders, Volker; Plessen, Birgit; Romer, Rolf, L.; Weise, Stephan M.; Banks, David A.; Hoth, Peet; Dulski, Peter; Schettler, Georg (2010): „Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin“. *Chemical Geology* 276, 198-208.
- Rückheim, Jürgen; Voigtländer, Gernot; Stein-Khokhlov, Maxim (2005): „The Technical and Economic Challenge of ‘Mature Gas Fields’: The Giant Altmark Field, a German Example“. *67th EAGE Conference & Exhibition*, Jun 2005, cp-1-00149. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.1.D005>.
- Steiger, Katharina; Hilgers, Christoph; Kolb, Jochen (2022): „Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030“. *SRG Working Paper 3, Angewandte Geowissenschaften*, Karlsruher Institut für Technologie KIT. DOI: 10.5445/IR/1000153059
- Wenke, Axel A.O.; Böcker, Johannes; Berling, Matthias; Determann, Matthias; Fischer, Dirk; Köhler, Volker; Lehmann, Silvio; Mozer, Thomas; Sluet, Joachim (2025): „Altmark Lithium Extraction – Redevelopment of a Brine Base Lithium Resource, Altmark Gas Field, Saxony-Anhalt, Germany“. *86th EAGE Annual Conference & Exhibition*, Jun 2025, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025101504>.

Reaktiv-Ionische Flüssigkeiten für eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen¹

Sebastian Hasenstab-Riedel, MLS

Freie Universität Berlin

Abstract

The imperative for the sustainable utilisation of resources is of increasing importance, and this necessitates innovative chemical approaches that combine high reactivity, safety, and energy efficiency. Reactive Ionic Liquids (RILs) represent a novel and versatile class of materials capable of meeting all of these requirements.

The present contribution sets forth novel methodologies founded upon the utilisation of Reactive Ionic Liquids. These approaches address industrial processes relevant to the production of basic chemicals, enable the utilisation of biomass, and contribute to indirect energy storage. Consequently, this class of materials possesses the potential to effect a substantial contribution to the transformation of the chemical industry and to the integration of the chemical and energy sectors.

¹ Der vorliegende, gekürzte und leicht abgewandelte Bericht beruht auf einer Veröffentlichung im Journal Green Chemistry (Merlin Kleoff, Franziska Klaucke, Patrick Voßnacker, Rainer Weber, Karsten Neuhoff, Sebastian Riedel Green Chem., 2025, 27, 9874-9881) und wurde mittels KI aus dem Englischen übersetzt. Die enthaltenen Abbildungen wurden mittels KI neu gestaltet.

Resümee

Das Erfordernis einer nachhaltigen Nutzung von Ressourcen, die eine hohe Reaktivität, Sicherheit und Energieeffizienz miteinander verbindet, führt zu einem zunehmenden Bedarf an innovativen chemischen Ansätzen. Reaktiv-Ionische Flüssigkeiten (Reactive Ionic Liquids, RILs) stellen eine neuartige und vielseitige Stoffklasse dar, die all diese Anforderungen erfüllen kann.

In diesem Beitrag werden neue Ansätze präsentiert, die auf der Verwendung von reaktiv-ionischen Flüssigkeiten basieren. Diese Ansätze adressieren industrielle Verfahren, die für die Herstellung von Basischemikalien von Relevanz sind. Sie gestatten die Nutzung von Biomasse und leisten einen Beitrag zur indirekten Stromspeicherung. Die vorliegende Stoffklasse hat das Potential, einen signifikanten Beitrag zur erforderlichen Transformation der chemischen Industrie sowie zur Kopplung der Sektoren Chemie und Energie zu leisten.

Keywords/Schlüsselwörter

Energy storage, ionic liquids, chlorine in relation to energy demand and energy storage

Energiespeicher, Ionische Flüssigkeiten, Chlor im Zusammenhang mit Energiebedarf und Energiespeicherung.

1 Einleitung

Die anhaltende Klimakrise erfordert einen raschen Übergang zu sauberen Energiequellen, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Daher haben Wind- und Solarenergie stark an Bedeutung gewonnen, da sie im Betrieb nahezu CO₂-frei arbeiten. (Hassan et al. 2024) Gleichzeitig stellt die zunehmende fluktuierende Stromerzeugung das bestehende Energiesystem, das auf zentralisierten und kontinuierlich arbeitenden Kraftwerken basiert, vor neue Herausforderungen. (Kondziella und Bruckner 2016) Deren Bewältigung erfordert präzisere Prognosen, den Ausbau der Netzinfrastruktur sowie insbesondere eine höhere Systemflexibilität (Sinsel et al. 2020).

Auch energieintensive Industrien wie die chemische Industrie sind von dieser Entwicklung betroffen. Sie arbeiten überwiegend im kontinuierlichen Betrieb und weisen einen hohen, konstanten Strombedarf auf. Die zunehmende Volatilität der Strompreise wirkt sich daher zunehmend

negativ auf ihre Wettbewerbsfähigkeit aus (Hermann et al. 2024). Der steigende Bedarf an Flexibilität sowie die Diskrepanz zwischen schwankender erneuerbarer Stromerzeugung und konstantem industriellem Energiebedarf verdeutlichen die Bedeutung leistungsfähiger Energiespeichersysteme. Diese sollen Versorgungslücken ausgleichen, Produktionsausfälle vermeiden und überschüssige Energie aus Zeiten hoher Wind- und Solarstromerzeugung speichern, um den Einsatz fossiler Reservekraftwerke zu reduzieren. (Koochi-Fayegh und Rosen 2020; Choudhury 2022).

Zu den etabliertesten Speichertechnologien zählt die elektrochemische Energiespeicherung (Electrochemical Energy Storage, EES), insbesondere in Form von unterschiedlichen Batteriesystemen. Sie wandeln elektrische Energie in chemische Energie um und stellen diese bei Bedarf wieder bereit. Dadurch eignen sie sich vor allem für kurz- bis mittelfristige Speichieranwendungen. Kommerzielle Lithium-Ionen-Batterien ermöglichen eine nahezu sofortige Netzstabilisierung, sind jedoch hinsichtlich ihrer Energiedichte begrenzt (Lin et al. 2025). Fortschritte bei Festkörper- und Metall-Luft-Batterien versprechen höhere Energiedichten und verbesserte Sicherheit (Yu et al. 2021). Herausforderungen bestehen jedoch weiterhin bei der Rohstoffversorgung, insbesondere von Lithium und Kobalt, sowie beim Recycling (Maisel et al. 2023).

Elektrische Energiespeicher wie Kondensatoren, Superkondensatoren und supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) speichern Energie direkt in elektrischen oder magnetischen Feldern (Feng et al. 2022). Während Kondensatoren und Superkondensatoren für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte geeignet sind, bieten SMES-Systeme sehr schnelle Reaktionszeiten und hohe Wirkungsgrade, erfordern jedoch eine aufwendige und kostenintensive Kryotechnik.

Thermische Energiespeicher (Thermal Energy Stores, TES) speichern Energie durch das Erwärmen oder Kühlen eines Speichermediums, beispielsweise Wasser, Salzschnmelzen oder Phasenwechselmaterialien. Während sensible Wärmespeicher vor allem zur Lastverschiebung in Gebäuden und industriellen Prozessen eingesetzt werden, ermöglichen Phasenwechselmaterialien höhere Energiedichten bei nahezu konstanter Temperatur. Auch thermochemische Speicher gewinnen für Langzeitspeichieranwendungen zunehmend an Bedeutung, sind jedoch technisch anspruchsvoller (Mahon et al. 2022).

Mechanische Energiespeicher speichern potenzielle oder kinetische Energie. Pumpspeicherkraftwerke nutzen überschüssigen Strom, um Wasser in höher gelegene Reservoirs zu fördern, während Druckluftspeicher (CAES) komprimierte Luft in Kavernen oder Behältern speichern. Schwungradspeicher speichern Energie in rotierenden Massen (Bazdar et al. 2022). Obwohl diese Technologien großtechnisch erprobt sind, erfordern sie vergleichsweise hohe Investitionen.

Zur chemischen Energiespeicherung zählen sogenannte Power-to-X-Verfahren, bei denen überschüssiger Strom in Energieträger wie Wasserstoff, Ammoniak oder synthetisches Erdgas umgewandelt wird. Diese können gespeichert und bei Bedarf wieder zur Stromerzeugung genutzt werden. Darüber hinaus sind Wasserstoff und Ammoniak wichtige Grundchemikalien mit vielfältigen industriellen Anwendungen (Schlögl 2021; Palys und Daoutidis 2022; Cormos 2023).

Parallel dazu gewinnt die Nachfrageflexibilität (Demand Response) energieintensiver Industrieprozesse an Bedeutung. Durch die Verlagerung des Stromverbrauchs in Zeiten niedriger Strompreise können Kosten gesenkt und zusätzliche Erlöse durch die Bereitstellung von Flexibilität erzielt werden (Gellings 1985). Besonders interessant ist die Kombination von Demand Response mit der Speicherung von Produkten im Rahmen von Power-to-X-Konzepten, da energieintensive Industrien über ganzjährig verfügbare hohe Lasten und bestehende Infrastrukturen verfügen (Gils 2014).

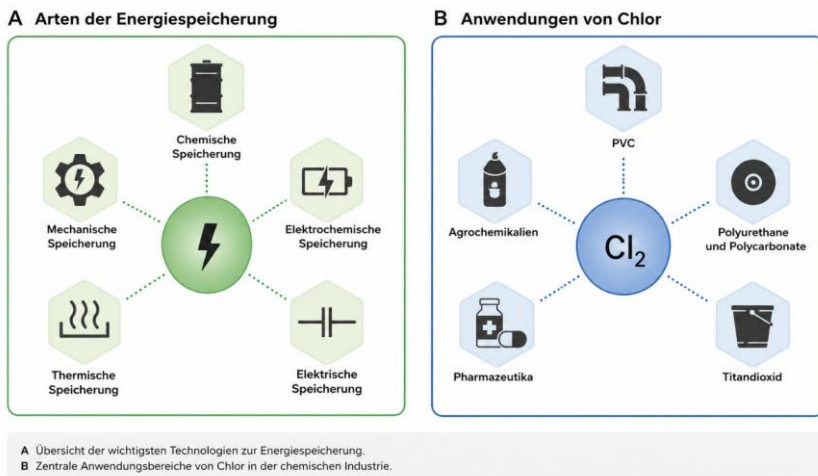


Abb. 1 Wichtige Formen der Energiespeicherung (A) sowie ausgewählte Beispiele für die Anwendung von Chlor (B).²

Abb. 1 (A) fasst wichtige Formen der Energiespeicherung zusammen. Im Folgenden betrachten wir die Basischemikalie Chlor, deren Herstellung große Mengen elektrischer Energie erfordert.

2 Chlor als energieintensive Basischemikalie

Chlor gehört zu den vielseitigsten Basischemikalien und ist für große Teile der chemischen Industrie unverzichtbar. (Schmittinger 2008; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2000; Lin et al. 2017). Es wird für die Herstellung von über 50% aller industriellen Chemikalien und Polymere benötigt (Lin et al. 2017), ebenso für 90% aller Arzneimittel und 86% aller Agrochemikalien (Tundo 2012). So wird Chlor beispielsweise mit Ethylen zu Ethylendichlorid (EDC) umgesetzt, das anschließend zu Vinylchlorid umgesetzt wird – dem Vorprodukt für Polyvinylchlorid (PVC), einem vielseitigen Polymer, das 2015 weltweit in

² Abbildung wurde mittels KI generiert.

einer Menge von 38 Millionen Tonnen produziert wurde (Deutschland 2022: 1,209 Mio. t) (Geyer et al. 2017; Database Eurostat 2025). In diesem Zusammenhang werden auch Polyurethane (PU, Deutschland 2022: 0,977 Mio. t) (Database Eurostat 2025) und Polycarbonate (PC, Deutschland 2022: 0,369 Mio. t) (Database Eurostat 2025) häufig aus Phosgen (COCl_2) hergestellt, das wiederum weltweit in einer Menge von etwa 12 Mio. t pro Jahr aus Chlor und Kohlenmonoxid produziert wird. Darüber hinaus benötigen viele weitere Materialien, etwa Silikone, Phosphortrichlorid (wichtig für Agrochemikalien, Pharmazeutika und Flammschutzmittel) sowie bestimmte Metalle (z. B. Titan für TiO_2) Chlor für ihre Herstellung. (Kleoff et al. 2023).

Abbildung 1 (B) zeigt ausgewählte Beispiele für die industrielle Anwendung von Chlor. Heute übersteigt die weltweite Chlorproduktion 100 Millionen Tonnen pro Jahr und wächst weiter. In Europa werden 95,2% des Chlors durch Chloralkali-Elektrolyse erzeugt, wobei Natronlauge (NaOH) und Wasserstoff als wertvolle Nebenprodukte anfallen. Die Chloralkali-Elektrolyse lässt sich in das moderne Membranverfahren (86,8% der europäischen Produktion) und das ältere, aber noch teilweise eingesetzte Diaphragmaverfahren (8,4%) unterteilen. Die verbleibenden 4,8% werden durch andere Verfahren, etwa die Reaktion von HCl und NaOCl , erzeugt. Obwohl das Membranverfahren stark optimiert ist, werden im Durchschnitt 2,58 MWh elektrische Energie pro Tonne Chlor benötigt (Klaucke et al. 2017; Klaucke et al. 2020), wodurch Stromkosten 67–77% der Produktionskosten ausmachen. In Deutschland entfallen dadurch etwa 1,7% des gesamten Stromverbrauchs auf Chloralkali-Elektrolysen (Schwan et al. 2025).

Dieser hohe Energiebedarf hat erhebliche Auswirkungen auf die Kostenstruktur und den CO_2 -Fußabdruck. Eine vollständige Versorgung mit erneuerbarem Strom könnte die Emissionen deutlich senken, allerdings führen die schwankenden Einspeisungen von Wind- und Solarenergie zu Herausforderungen für die Netzstabilität. Bereits heute tragen Chlorproduzenten durch flexible Anpassung ihrer Produktion zur Stabilisierung des Stromnetzes bei.

Nach „Euro Chlor“ erfordert ein vollständig auf Wind- und Solarstrom basierender Betrieb jedoch ein grundlegend neues Systemdenken. Dazu zählen unter anderem die Stromspeicherung, eine höhere Flexibilität der Produktion über Elektrolyse sowie der nachgelagerten Prozesse. Dies bedingt ebenfalls eine Erhöhung der Produktlagerkapazitäten entlang der Wertschöpfungskette (Klaucke et al. 2023).

Die Speicherung von Elektrizität ist dabei eine naheliegende Lösung, sollte jedoch durch spezifischere Ansätze ergänzt werden. Alternativ kann die Chlorproduktion selbst flexibel an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien angepasst werden, da die Membrantechnologie innerhalb technischer Grenzen gut regelbar ist. Dadurch lässt sich überschüssige erneuerbare Energie nutzen, indem die Produktion hochgefahren und Chlor zwischengespeichert wird, während in Zeiten geringer Verfügbarkeit zuvor produziertes Chlor verbraucht wird.

Die großskalige Speicherung von Chlor ist jedoch aufgrund seiner hohen Toxizität mit erheblichen Risiken verbunden (Hearn et al. 2013). So kam es beispielsweise 2022 im Hafen von Akaba (Jordanien) zu einem schweren Unfall mit einer Druckbehälterfreisetzung, bei dem 13 Menschen starben und über 250 verletzt wurden. Im Durchschnitt ereignet sich in Europa etwa ein chlorbezogener Zwischenfall pro Million Tonnen produzierten Chlors pro Jahr. Daher unterliegt der Transport strengen regulatorischen Vorgaben, wie etwa in der Schweiz. Auch die lokale Lagerung erfordert umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen. In Deutschland werden beispielsweise Schutzabstände zu chlortechnischen Anlagen vorgeschrieben; empfohlen wird ein Abstand von bis zu 1,35 km. Aufgrund dieser Einschränkungen wird die Lagerung großer Chlormengen meist vermieden, was wiederum das Flexibilitätspotenzial der Chloralkali-Elektrolyse begrenzt. Nur wenige Wertschöpfungsketten, wie etwa PVC, können mit schwankenden Chlorzufuhren umgehen. Daher müssen neue Konzepte zur großskaligen Chlorlagerung zunächst die inhärenten Gefahren von elementarem Chlor adressieren.

3 Trichlorid-basierte Ionische Flüssigkeiten als indirekte Energiespeicher

Trotz der breiten Anwendungen von Chlor ist seine Nutzung aufgrund der hohen Gefahren, die mit Chlor verbunden sind, deutlich eingeschränkt. Es ist ein hochtoxisches, korrosives und reaktives, gelbgrünes Gas mit einem Siedepunkt von -34 °C . Bei Lagerung und Transport wird es üblicherweise unter Druck verflüssigt, wobei flüssiges Chlor entsteht, das bei 20 °C einen Dampfdruck von 6,7 bar aufweist (Voßnacker et al. 2022).

Kürzlich entwickelten Riedel und Mitarbeitende trichlorid-basierte Ionische Flüssigkeiten (ILs), die eine sichere Speicherung von Chlor

ermöglichen und dabei selbst bei erhöhten Temperaturen einen niedrigen Chlordruck aufweisen (Voßnacker et al. 2022). Daher würde im Havariefall bzw. bei Auftreten eines Lecks kein Chlorgas, sondern vielmehr eine Flüssigkeit austreten. Diese in Luft relativ stabile Ionische Flüssigkeit verhindert somit die unmittelbare Freisetzung von Chlor. Ein Screening verschiedener Trichlorid-Vorläufer ergab, dass Triethylmethylammoniumchlorid $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ das vielversprechendste Chlor-Speichermaterial ist. Das entsprechende Trichlorid $[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}(\text{Cl}_2)]$ ist eine Ionische Flüssigkeit bei Raumtemperatur und bildet sich leicht bei der Reaktion von Triethylmethylammoniumchlorid $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ mit Chlorgas. Auf diese Weise kann eine Tonne Ammoniumchlorid bis zu 0,79 t Cl_2 speichern. Da das Trichlorid im Gleichgewicht mit dem Ammoniumsalz und Chlorgas steht, kann das gespeicherte Chlor durch Erhitzen der Ionischen Flüssigkeit auf etwa 80 °C oder durch Anlegen von Vakuum freigesetzt werden, wobei das Speichermedium $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ regeneriert wird. Alternativ kann durch Zugabe von Wasser das gespeicherte Chlor vollständig freigesetzt werden, wobei eine wässrige Lösung von $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ entsteht. In Zeiten geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien könnte das zuvor gespeicherte Chlor entweder aus der Ionischen Flüssigkeit freigesetzt oder alternativ direkt als Chlorierungsmittel für die Herstellung wichtiger chlorbasierter Produkte wie Phosgen verwendet werden. Da $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ aus den beiden kostengünstigen Basischemikalien Chlormethan und Triethylamin hergestellt werden kann, wird bei industrieller Produktion mit Kosten zwischen 4000 und 20.000 USD pro Tonne gerechnet.

Generell zeigt sich, dass das Trichlorid $[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}(\text{Cl}_2)]$ bei Raumtemperatur mindestens zwei Jahre stabil ist und sich somit für die Langzeitspeicherung von Chlor geeignet ist. Zudem bietet es den Vorteil, bei Raumtemperatur eine Ionische Flüssigkeit zu sein, wodurch es sich in industriellen Anlagen leicht pumpen bzw. transportieren lässt. Allerdings ist zu beachten, dass Trichloride als stark korrosiv gelten, was die Auswahl geeigneter Konstruktionsmaterialien einschränkt.

Grundlage der besonderen Stabilität der Trichloride ist die Halogenbindung, bei der das Chloridion (Cl^-) Elektronendichte in das sogenannte σ -Loch einbringt, welches entlang der $\text{Cl}-\text{Cl}$ -Bindungsachse des Chlormoleküls (Cl_2) liegt. Dadurch werden antibindende Orbitale des Chlormoleküls teilweise besetzt, was zur Folge hat, dass die $\text{Cl}-\text{Cl}$ -Bindung im Trichlorid im Vergleich zu elementarem Chlor geschwächt

und verlängert ist (Sonnenberg et al. 2020). Dies führt auch zu einer leicht erhöhten Reaktivität der Trichloride gegenüber elementarem Chlor bei gleichzeitiger besserer Handhabbarkeit. Die trichlorid-basierte Ionische Flüssigkeit könnte die bestehende Lücke zwischen dem hohen Potenzial von Chlor als indirektem Energiespeicher und dem derzeit fehlenden sicheren und skalierbaren Speichersystem schließen. Wenn erneuerbare Energien aufgrund temporärer Wetterbedingungen im Überfluss vorhanden sind, könnte die Chlorproduktion hochgefahren werden und das überschüssig erzeugte Chlor sicher als Ionische Flüssigkeit $[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}(\text{Cl}_2)]$ gespeichert werden (Voßnacker et al. 2022). Bei Anwendung dieser Speichermethode können pro Tonne $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ bis zu 0,79 t Cl_2 gespeichert werden. Da die Herstellung von Chlor etwa 2,58 MWh_{el} pro Tonne Cl_2 verbraucht, kann eine Tonne vollständig beladenes Trichlorid $[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}(\text{Cl}_2)_{1.7}]$, das 0,44 t Cl_2 speichert, indirekt etwa 1,1 MWh_{el} pro Tonne $[\text{Cl}_3]$ -Äquivalent speichern. Zum Vergleich: Eine konventionelle Lithium-Ionen-Batterie weist selbst bei hoher spezifischer Energiedichte von etwa 0,25 MWh_{el} pro Tonne eine deutlich geringere Speicherkapazität auf (Kleoff et al. 2025). Zur Veranschaulichung liefert eine Chloralkali-Elektrolyseanlage mit einer Kapazität von 1000 t Cl_2 pro Tag etwa 2000 t Cl_2 und verbraucht innerhalb von zwei Tagen 5,2 GWh_{el} . Die Speicherung einer solchen Menge Chlor mithilfe der trichlorid-basierten Ionischen Flüssigkeit würde ein Volumen von 3760 m^3 erfordern – was etwa eineinhalb olympische Schwimmbecken entspricht. Im Vergleich dazu hat das Pumpspeicherkraftwerk Wehr im Schwarzwald etwa 6,07 GWh_{el} bei einem Reservoirvolumen von 4,4 Millionen m^3 , entsprechend rund 1760 olympischen Schwimmbecken (Kleoff et al. 2025). Obwohl Pumpspeichersysteme eine wichtige Rolle im Energiemanagement spielen, zeigen der hohe Flächenbedarf und die begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Standorte den Nutzen zusätzlicher Speicheroptionen wie sie durch Sektorkopplung, hier zwischen Energie- und Chlortechnologien bestehen, auf.

4 Direkte Nutzung des beladenen Chlorspeichers

Es ist bekannt, dass Trichloride ebenfalls als sehr gute Chlorierungsmittel eingesetzt werden können. Ein prominentes Beispiel ist das feste Reagenz $[\text{NEt}_4][\text{Cl}_3]$, das als nützliches und leicht handhabbares Chlorierungsmittel dient, etwa für die Anti-Addition von Chlor an Alkene und

Alkine, die α -Chlorierung von Ketonen oder die Chlorierung elektronenreicher Aromaten. Daher kann der beladene Chlorspeicher $[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}_3]$ anstelle der Freisetzung und anschließenden Nutzung des gespeicherten Chlors direkt für weitere Chlorierungsreaktionen verwendet werden, beispielsweise für die Synthese der Basischemikalie Phosgen (COCl_2). Dabei zeigt er sogar eine erhöhte Reaktivität im Vergleich zu elementarem Chlor. Auf diese Weise könnte die für die Freisetzung von Chlor benötigte Energiemenge verringert, wenn nicht sogar eingespart werden. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass es elementares Chlor in allen etablierten Chlorierungsprozessen vollständig ersetzen kann. Nichtsdestotrotz könnte der größte aktuelle Nachteil der industriellen Chlorspeicherung – die Gefahr großer Mengen an druckverflüssigtem Chlor – durch den Einsatz von Trichloriden als Speichersysteme im Wesentlichen überwunden werden (Abbildung 2). Auf diese Weise könnte die Trichlorid-Speicherung zur Flexibilisierung der Chlorproduktion beitragen und damit die Anpassung an erneuerbare Energien unterstützen (Kleoff et al. 2025).

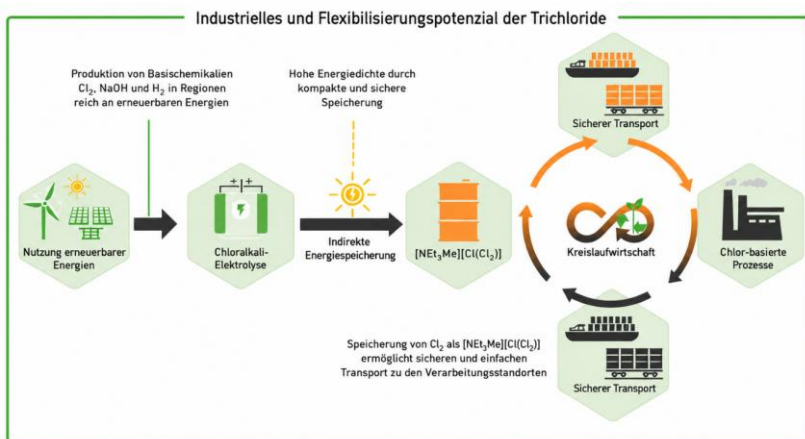


Abb. 2 Geplante Nutzung des auf Trichlorid basierenden Chlorspeichers als Energiespeicher, der den sicheren Transport von Chlor über große Entfernungen ermöglicht.³

³ Abbildung KI generiert.

5 Trichloride als globaler Energieshuttle

Trichloridbasierte Ionische Flüssigkeiten könnten auch als Medium für den internationalen Transport von Chlor betrachtet werden. Unter Nutzung der trichlorid-basierten Ionischen Flüssigkeit würde dies ermöglichen, Chlor zusammen mit Wasserstoff und Natronlauge mittels Chloralkali-Elektrolyse in Regionen mit hohem Anteil erneuerbarer Energien zu produzieren, als Trichlorid $[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}(\text{Cl}_2)]$ zu speichern, über große Entfernungen zu transportieren und für chemische Prozesse in Deutschland oder Europa bereitzustellen. Damit könnte es Wasserstoffimporte als Energieträger ergänzen. Weitere Studien sind jedoch erforderlich, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit der benötigten robusten Transportinfrastruktur zu bewerten. Ein Vergleich müsste sowohl die flexible inländischer Produktion in Zeiten hoher Wind- und Solarstromerzeugung als auch die attraktiven Speichereigenschaften des Trichlorids berücksichtigen. Ebenso sind Sicherheitsbewertungen im Vergleich zum internationalen Transport von Ammoniak oder Wasserstoff erforderlich.

6 Zusammenfassung

Chlor ist eine zentrale Basischemikalie für die chemische Industrie und unverzichtbar für die Synthese zahlreicher Materialien, Polymere, Zwischenprodukte und Pharmazeutika. Die weltweite Produktion von über 100 Mio. Tonnen pro Jahr basiert nahezu vollständig auf der Chloralkali-Elektrolyse, einem Verfahren, das $2,58 \text{ MWh}_{\text{el}}$ pro Tonne Cl_2 erfordert. Eine Versorgung dieses Energiebedarfs durch Wind-, Solar- und andere erneuerbare Energiequellen könnte die industriellen CO_2 -Emissionen deutlich senken. Allerdings erfordert dieses Ziel einen flexiblen Betrieb der Chloralkali-Elektrolyseure in Abhängigkeit von schwankenden Einspeisungen erneuerbarer Energien. Während die Chloralkali-Elektrolyse ihre Last anpassen kann, benötigen die meisten nachgeschalteten Anlagen eine kontinuierliche Versorgung mit Chlor. Da jedoch druckverflüssigtes Cl_2 hochtoxisch und korrosiv ist, ist die Speicherung großer Chlormengen in der Praxis kaum realisierbar. Folglich ist die Netzintegration von Chloralkali-Anlagen derzeit durch das Fehlen eines sicheren Speichersystems mit hoher Kapazität begrenzt. Jüngste Arbeiten zeigten, dass Triethylmethyllammonium-Trichlorid,

$[\text{NEt}_3\text{Me}][\text{Cl}(\text{Cl}_2)]$, eine vielversprechende Lösung darstellen könnte. Dieses sichere Chlorspeichermedium ist eine leicht handhabbare Ionische Flüssigkeit bei Raumtemperatur, die durch Reaktion von Chlor mit dem kostengünstigen Salz $[\text{NEt}_3\text{Me}]\text{Cl}$ gebildet wird. Chlor kann aus dem Speicher durch Erhitzen, Vakuum oder Wasserzugabe freigesetzt werden; alternativ kann die beladene Flüssigkeit direkt als Chlorierungsmittel eingesetzt werden. Ihre Energiedichte liegt bei etwa $1,1 \text{ MWh}_{\text{el}}$ pro Tonne und übertrifft damit selbst Lithium-Ionen-Batterien im großtechnischen Maßstab. Diese Ammonium-Trichloride könnten die Elektrolyse von der Echtzeitnachfrage entkoppeln und somit erneuerbare Überschüsse zur Überbrückung von Zeiten geringer Einspeisung nutzbar machen. Zur Umsetzung dieser Vision sind jedoch weitere Untersuchungen und insbesondere verfahrenstechnische Arbeiten erforderlich, etwa zu temperatur- und konzentrationsabhängigen Viskositäten, dem Verhalten bei sehr hohen Temperaturen sowie zum Design geeigneter Speichertanks, die derzeit an der FU Berlin durchgeführt werden.

Bibliographie

- Bazdar, Elahieh; Sameti, Mohammad; Nasiri, Fuzhan; Haghighat, Fariborz (2022): "Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701.
- Choudhury, Subhashree (2022): "Review of energy storage system technologies integration to microgrid: Types, control strategies, issues, and future prospects". *Journal of Energy Storage* 48, 103966. DOI: 10.1016/j.est.2022.103966.
- Cormos, Calin-Cristian (2023): "Deployment of integrated Power-to-X and CO_2 utilization systems: Techno-economic assessment of synthetic natural gas and methanol cases". *Applied Thermal Engineering* 231, 120943. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120943.
- Database Eurostat (2025): Database Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/ds-056121__custom_16146920, 30 April 2025.
- Feng, Qi-Kun; Zhong, Shao-Long; Pei, Jia-Yao; Zhao, Yu; Zhang, Dong-Li; Liu, Di-Fan et al. (2022): "Recent Progress and Future Prospects on All-Organic Polymer Dielectrics for Energy Storage

- Capacitors". *Chemical Reviews* 3/122, 3820-3878.
DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00793.
- Gellings, C. W. (1985): "The concept of demand-side management for electric utilities". *Proc. IEEE* 10/73, 1468-1470.
DOI: 10.1109/PROC.1985.13318.
- Geyer, Roland; Jambeck, Jenna R.; Law, Kara Lavender (2017): "Production, use, and fate of all plastics ever made". *Science Advances* 7/3, e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- Gils, Hans Christian (2014): "Assessment of the theoretical demand response potential in Europe". *Energy* 67, 1-18.
DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.019.
- Hassan, Qusay; Algburi, Sameer; Sameen, Aws Zuhair; Al-Musawi, Tariq J.; Al-Jiboory, Ali Khudhair; Salman, Hayder M. et al. (2024): "RETRACTED: A comprehensive review of international renewable energy growth". *Energy and Built Environment*.
DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.12.002.
- Hearn, John D.; Weber, Richard; Nichols, Robert; Henley, Michael V.; Fox, Shannon (2013): "Deposition of Cl₂ on soils during outdoor releases". *Journal of hazardous materials* 252/253, 107-114.
DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.02.038.
- Hermann, Julia; Rusche, Simon; Moder, Linda; Weibelzahl, Martin (2024): "Watt's Next? Leveraging Process Flexibility for Power Cost Optimization". *Bus Inf Syst Eng* 5/66, 541-563.
DOI: 10.1007/s12599-024-00888-1.
- Klaucke, Franziska; Hoffmann, Christian; Hofmann, Mathias; Tsatsaronis, George (2020): "Impact of the chlorine value chain on the demand response potential of the chloralkali process". *Applied Energy* 276, 115366. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115366.
- Klaucke, Franziska; Karsten, Tim; Holtrup, Frank; Esche, Erik; Morosuk, Tatiana; Tsatsaronis, George; Repke, Jens-Uwe (2017): "Demand Response Potentials for the Chemical Industry". *Chemie Ingenieur Technik* 9/89, 1133-1141. DOI: 10.1002/cite.201600073.
- Klaucke, Franziska; Müller, Robert; Hofmann, Mathias; Weigert, Joris; Fischer, Peter; Vomberg, Sebastian et al. (2023): "Chlor-alkali Process with Subsequent Polyvinyl Chloride Production–Cost Analysis and Economic Evaluation of Demand Response". *Ind. Eng. Chem. Res.* 19/62, 7336-7351. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c04188.

- Kleoff, Merlin; Klaucke, Franziska; Voßnacker, Patrick; Weber, Rainer; Neuhoﬀ, Karsten; Riedel, Sebastian (2025): "Utilisation of reactive ionic liquids for energy storage and regulation of the power grid". *Green Chem* 33/27, 9874-9881. DOI: 10.1039/D5GC02519B.
- Kleoff, Merlin; Voßnacker, Patrick; Riedel, Sebastian (2023): "The Rise of Trichlorides Enabling an Improved Chlorine Technology". *Angewandte Chemie International ed. in English* 17/62, e202216586. DOI: 10.1002/anie.202216586.
- Kondziella, Hendrik; Bruckner, Thomas (2016): "Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – a review of research results and methodologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 10-22. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.199.
- Koohi-Fayegh, S.; Rosen, M. A. (2020): "A review of energy storage types, applications and recent developments". *Journal of Energy Storage* 27, 101047. DOI: 10.1016/j.est.2019.101047.
- Lin, Ronghe; Amrute, Amol P.; Pérez-Ramírez, Javier (2017): "Halogen-Mediated Conversion of Hydrocarbons to Commodities". *Chemical Reviews* 5/117, 4182-4247. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00551.
- Lin, Yi; Somervill, Lucy G.; Rashid, Rehan; Ledesma, Rodolfo I.; Kang, Jin Ho; Kavanagh, Alison R. et al. (2025): "Toward 500 Wh Kg⁻¹ in Specific Energy with Ultrahigh Areal Capacity All-Solid-State Lithium-Sulfur Batteries". *Small* 29/21, e2409536. DOI: 10.1002/sml.202409536.
- Mahon, Harry; O'Connor, Dominic; Friedrich, Daniel; Hughes, Ben (2022): "A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops". *Energy* 239, 122207. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122207.
- Maisel, Franziska; Neef, Christoph; Marscheider-Weidemann, Frank; Nissen, Nils F. (2023): "A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles". *Resources, Conservation and Recycling* 192, 106920. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106920.
- Palys, Matthew J.; Daoutidis, Prodromos (2022): "Power-to-X: A review and perspective.". *Computers & Chemical Engineering* 165, 107948. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107948.
- Schlögl, Robert (2021): "Chemical energy storage enables the

- transformation of fossil energy systems to sustainability”. *Green Chem* 4/23, 1584-1593. DOI: 10.1039/D0GC03171B.
- Schmittinger, Peter (2000): *Chlorine: principles and industrial practice*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
<https://doi.org/10.1002/9783527613380.ch3>
- Schwan, Johannes; Kleoff, Merlin; Dreyhsig, Gesa H.; Voßnacker, Patrick; Fiedler, Traute; Rosental, Marian; Riedel, Sebastian (2025): “Rethinking Chlorine: Essential Chemical or Replaceable Risk?”. *ChemSusChem* 13/18, e202402697. DOI: 10.1002/cssc.202402697.
- Sinsel, Simon R.; Riemke, Rhea L.; Hoffmann, Volker H. (2020): “Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review”. *Renewable Energy* 145, 2271-2285. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.147.
- Sonnenberg, Karsten; Mann, Lisa; Redeker, Frenio A.; Schmidt, Benjamin; Riedel, Sebastian (2020): “Polyhalogen and Polyinterhalogen Anions from Fluorine to Iodine”. *Angewandte Chemie International ed. in English* 14/59, 5464-5493.
DOI: 10.1002/anie.201903197.
- Tundo, Pietro (2012): “Chlorine-free synthesis: An overview”. *Pure and Applied Chemistry* 3/84, 411-423.
DOI: 10.1351/PAC-CON-12-02-02.
- Schmittinger, Peter (2000): *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry - Chlorine*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
- Voßnacker, Patrick; Schwarze, Nico; Keilhack, Thomas; Kleoff, Merlin; Steinhauer, Simon; Schiesser, Yuliya et al. (2022): “Alkyl Ammonium Chloride Salts for Efficient Chlorine Storage at Ambient Conditions”. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 29/10, 9525-9531.
DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c02186.
- Yu, Qihang; Tang, Wu; Hu, Yang; Gao, Jian; Wang, Ming; Liu, Sihong et al. (2021): “Novel low-cost, high-energy-density (>700 Wh kg⁻¹) Li-rich organic cathodes for Li-ion batteries”. *Chemical Engineering Journal* 415, 128509. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128509.

Energie- und Mobilitätswende als Rohstoffwende

Warum eine reine 1:1-BEV-Elektrifizierung nicht ausreicht und Batterierecycling zur Systembedingung wird¹

Ernst-Peter Jeremias, Norbert Mertzsch, Gerhard Pfaff

(alle MLs)

Abstract

The present article examines the energy and mobility transition as a resource-dependent transformation. The starting point of this analysis is the observation that while the electrification of passenger vehicle traffic represents a central pathway to efficiency, it does not automatically lead to sufficiently sustainable mobility if the existing vehicle fleet and usage patterns remain unchanged. Consequently, three interconnected levels are critical: first, the establishment of reliable political and regulatory frameworks; second, the implementation of mobility strategies that prioritise the avoidance and shift of traffic while simultaneously improving residual traffic; and third, the establishment of closed material loops for batteries and critical raw materials. In this context, battery recycling is regarded not solely as a waste disposal technology, but as a pivotal element of industrial, raw material, and resilience policy. Moreover, the economic viability of “second-life” batteries is evaluated in the context of the precipitous decline in prices of new units. While the decline in battery prices does indeed result in a narrowing of the economic margin, it does

¹ Der Text basiert auf dem Vortrag des Verfassers beim 5. Rohstoffkolloquium der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. Diese Textfassung wurde mit Unterstützung von ChatGPT 4.0 erstellt.

not invalidate the “cascade principle” – provided that suitable batteries (characterised by high residual capacity, reliable condition data, and minimal refurbishment requirements) are repurposed in a manner that supports grid stability.

Resümee

Der vorliegende Beitrag betrachtet die Energie- und Mobilitätswende als rohstoffgebundene Transformation. Ausgangspunkt der Untersuchung ist die Feststellung, dass die Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs einen zentralen Effizienzpfad darstellt. Allerdings führt sie bei unverändertem Fahrzeugbestand und unveränderter Nutzungsstruktur nicht automatisch zu einer hinreichend nachhaltigen Mobilität. Daher sind drei miteinander verknüpfte Ebenen von entscheidender Bedeutung: erstens verlässliche politische und regulatorische Rahmenbedingungen, zweitens Mobilitätsstrategien, die darauf abzielen, Verkehr zu vermeiden, zu verlagern und den verbleibenden Verkehr zu verbessern, und drittens geschlossene Stoffkreisläufe für Batterien und kritische Rohstoffe. In diesem Verständnis wird der Begriff des Batterierecyclings nicht nur als Entsorgungstechnik definiert, sondern als ein integraler Bestandteil der Industrie-, Rohstoff- und Resilienzpolitik betrachtet. In der vorliegenden Untersuchung wird die Wirtschaftlichkeit von Second-Life-Batterien unter dem Eindruck stark gefallener Neupreise ergänzend analysiert. Sinkende Batteriepreise verringern zwar den ökonomischen Spielraum, widerlegen jedoch nicht das Kaskadenprinzip, sofern geeignete Batterien mit hoher Restkapazität, belastbaren Zustandsdaten und geringem Aufbereitungsaufwand netzdienlich weitergenutzt werden.

Keywords/Schlüsselwörter

Electromobility; battery recycling; circular economy; critical raw materials; mobility transition; second life; EU Battery Regulation; Critical Raw Materials Act; digital product passports
 Elektromobilität; Batterierecycling; Kreislaufwirtschaft; kritische Rohstoffe; Mobilitätswende; Second Life; EU-Batterieverordnung; Critical Raw Materials Act; digitale Produktpässe

1 Ausgangspunkt: Transformation als Energie-, Mobilitäts- und Rohstofffrage

Die deutsche Energie- und Mobilitätswende wird in öffentlichen Debatten häufig über Technologien beschrieben: erneuerbare Stromerzeugung, Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge, Ladeinfrastruktur, Speicher oder digitale Netze. Diese technische Perspektive ist notwendig, aber unvollständig. Jede dieser Technologien besitzt eine materielle Grundlage. Sie benötigt Stahl, Kupfer, Aluminium, Halbleiter, Kunststoffe, Batteriematerialien und in bestimmten Anwendungen Seltene Erden. Die Transformation ist deshalb nicht nur eine Energiefrage, sondern zugleich eine Rohstofffrage. Je schneller der Umbau erfolgen soll, desto wichtiger werden gesicherte Lieferketten, Rohstoffeffizienz, Kreislaufführung und standardisierte Rückführung der eingesetzten Materialien.

Für den Verkehrssektor gilt dies in besonderer Weise. Der batterieelektrische Pkw vermeidet im Betrieb lokale Abgasemissionen und nutzt Strom im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Pfaden sehr effizient. Er ist deshalb ein zentraler Baustein der Dekarbonisierung des Straßenverkehrs. Daraus folgt jedoch nicht, dass eine einfache 1:1-Ersetzung des heutigen Pkw-Bestands durch batterieelektrische Fahrzeuge bereits eine vollständig nachhaltige Mobilitätsstrategie wäre. Ein hoher Fahrzeugbestand, geringe Auslastung privater Pkw, weiter steigende Fahrzeuggrößen und zusätzliche Infrastrukturbedarfe können den Ressourcenbedarf und damit auch die internationalen Abhängigkeiten erneut erheblich erhöhen. Die entscheidende Frage lautet daher nicht, ob Elektromobilität notwendig ist, sondern wie sie so organisiert wird, dass Energiebedarf, Materialdurchsatz und Importabhängigkeiten begrenzt werden.

Die hier vertretene Kernthese lautet: Die Dekarbonisierung des Verkehrs scheitert nicht primär an fehlender Einzeltechnik. Viele technische Bausteine sind vorhanden oder im industriellen Hochlauf. Kritisch sind vielmehr Konsistenz der politischen Rahmenbedingungen, Planbarkeit von Investitionen, rechtlich abgesicherte Marktregeln und leistungsfähige Stoffkreisläufe. Ohne Kreislaufwirtschaft kann sich ein Teil der Klimaschutzpolitik von der Emissionsfrage in eine Rohstoff- und Lieferkettenfrage verlagern. Batterierecycling wird damit zu einer Systembedingung der Mobilitäts- und Energiewende.

2 Politische Signalqualität als Investitionsbedingung

Transformation erfordert langfristige Investitionen. Heizungsanlagen, Ladeinfrastruktur, Stromnetze, Zellfabriken, Recyclinganlagen und industrielle Rückgewinnungskapazitäten werden nicht für wenige Jahre, sondern für Zeiträume von zehn bis mehr als dreißig Jahren geplant. Deshalb ist politische Signalqualität ein eigenständiger Investitionsfaktor. Gemeint sind Klarheit der Ziele, Konsistenz der Instrumente, Verlässlichkeit von Übergangsfristen und die Erwartung, dass Förder- und Regulierungsbedingungen nicht abrupt wechseln. Diese Signalqualität ist keine parteipolitische Kategorie, sondern eine ökonomische und institutionelle Voraussetzung für Investitionsentscheidungen.

Der Gebäudewärmesektor zeigt exemplarisch, wie stark Regeländerungen und Kommunikationsdynamiken Investitionsentscheidungen beeinflussen können. Das Gebäudeenergiegesetz sah für neue Heizungen den schrittweisen Übergang zu mindestens 65 Prozent erneuerbarer Energie vor, eng verbunden mit der kommunalen Wärmeplanung. Nach Darstellung der Bundesregierung sollte diese Verpflichtung spätestens Mitte 2028 flächendeckend wirksam werden; für Neubauten in Neubaugebieten galt sie bereits ab 2024 (GEG 2026). Im Mai 2026 beschloss das Bundeskabinett den Entwurf eines Gebäudemodernisierungsgesetzes, mit dem die Vorgabe eines einheitlichen Mindestanteils von 65 Prozent erneuerbarer Energien entfallen und eine technologieoffenere Heizungswahl ermöglicht werden soll. Zugleich ist für fossile Heizsysteme eine stufenweise Erhöhung klimafreundlicher Brennstoffanteile ab 2029 („Biogastreppe“) vorgesehen; die parlamentarische Beratung ist für die rechtliche Endfassung maßgeblich (BMWSB 2026). Unabhängig von der inhaltlichen Bewertung zeigt dieses Beispiel, dass der politische Pfad selbst Erwartungen, Investitionsbereitschaft und Marktdynamik beeinflusst.

Ein vergleichbares Muster zeigt sich bei der Förderung der Elektromobilität. Der Umweltbonus für Elektrofahrzeuge wurde nach Angaben des BAFA mit Ablauf des 17. Dezember 2023 beendet; neue Anträge konnten danach nicht mehr gestellt werden (BAFA 2023). Dieser abrupte Einschnitt war für Hersteller, Händler, private Käufer und Flottenbetreiber ein starkes Marktsignal. Im Jahr 2026 wurde ein neues, sozial gestaffeltes Förderprogramm angekündigt, das private Haushalte beim Kauf oder Leasing bestimmter neuer Elektrofahrzeuge unterstützt und

rückwirkend für Neuzulassungen ab dem 1. Januar 2026 gelten soll (BMUKN 2026a). Beide Vorgänge zeigen, dass Förderung nicht nur als Transferzahlung wirkt, sondern Vertrauen und Markterwartungen strukturiert. Für Recyclingmärkte gilt dies in gleicher Weise: Anlagen für hochwertige Rückgewinnung werden nur dann wirtschaftlich planbar, wenn künftige Materialströme, Qualitätsanforderungen und Abnahmebedingungen hinreichend verlässlich sind.

Auch das Deutschlandticket ist im Zusammenhang mit der Mobilitätswende relevant, weil es den Blick von der Fahrzeugtechnik auf die Organisation von Mobilität lenkt. Der Bund hat nach Angaben der Bundesregierung die Finanzierung langfristig bis 2030 abgesichert und stellt dafür weiterhin Mittel bereit (BReg 2026). Das Deutschlandticket ersetzt keine umfassende Verkehrswende, aber es wirkt als Signal für eine stärker integrierte Angebotslogik des öffentlichen Verkehrs. In dieser Perspektive wird deutlich: Dekarbonisierung des Verkehrs ist nicht ausschließlich eine Frage des Antriebs, sondern auch der Verkehrsvermeidung, der Verkehrsverlagerung und der besseren Auslastung vorhandener Mobilitätsangebote.

3 Mobilitätswende: Vermeiden, Verlagern, Verbessern

Für eine systematische Einordnung eignet sich die international gebräuchliche Avoid-Shift-Improve-Logik. Danach werden Verkehrssysteme nicht allein durch effizientere Fahrzeuge verbessert, sondern durch drei Ebenen: unnötige Wege vermeiden oder verkürzen, verbleibende Wege auf ressourcenschonendere Verkehrsmittel verlagern und den nicht vermeidbaren Verkehr technologisch verbessern. Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) beschreibt diesen Ansatz als Leitprinzip nachhaltiger Mobilität: Avoid reduziert unnötigen Verkehr, Shift verlagert auf umweltfreundliche Verkehrsträger und Improve macht den verbleibenden Verkehr effizienter und sauberer (GIZ 2026).

Auf den Pkw-Verkehr übertragen bedeutet dies: Die Elektrifizierung des Pkw ist primär ein Improve-Instrument. Sie verbessert die Energieeffizienz und vermindert Treibhausgasemissionen, sofern der eingesetzte Strom zunehmend aus Einkommensenergien stammt. Sie beantwortet aber nicht alle Fragen der Mobilität. Wenn die Zahl der Fahrzeuge, die

durchschnittliche Fahrzeuggröße, die Fahrleistung und die geringe Auslastung privater Pkw unverändert bleiben, sinken zwar die betrieblichen Emissionen pro Kilometer, der Materialbedarf bleibt jedoch hoch. Die rohstoffpolitisch stärkste Wirkung entsteht erst dann, wenn Elektromobilität mit Vermeidung, Verlagerung und gemeinschaftlicher Nutzung kombiniert wird.

Daraus ergibt sich eine andere Gewichtung der Mobilitätspolitik. Kompakte Siedlungsstrukturen, digitale Dienstleistungen, kurze Wege, intermodale Angebote, öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV), Rad- und Fußverkehr, Carsharing und On-Demand-Lösungen verringern den erforderlichen Fahrzeugbestand. Gerade im ländlichen Raum können elektrische Sharing- und Zubringerangebote die erste und letzte Meile sichern, ohne dass jeder Haushalt ein zusätzliches Fahrzeug vorhalten muss. Je besser solche Konzepte funktionieren, desto geringer ist der Bedarf an Batterien, Metallen und Ladeinfrastruktur pro Personenkilometer. Die Kreislaufwirtschaft beginnt daher nicht erst am Ende des Produktlebens, sondern bereits bei der Frage, wie viele Produkte für die gleiche Mobilitätsleistung benötigt werden.

4 Kritische Rohstoffe: Abhängigkeit statt einfacher Knappheit

Der Rohstoffengpass der Energiewende ist weniger als einfache geologische Knappheit zu verstehen. Entscheidend sind vielmehr Förderung, Raffination, Verarbeitung, Qualität, Preisvolatilität, geopolitische Konzentration und Zugang zu verlässlichen Lieferketten. Für Batterien sind Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan relevant. Für Leistungselektronik, Kabel, Netze und Ladeinfrastruktur spielen Kupfer, Aluminium und Halbleitermaterialien eine zentrale Rolle. Bei bestimmten Elektromotoren kommen Permanentmagnete zum Einsatz, für die Seltene Erden wie Neodym, Praseodym, Dysprosium oder Terbium wichtig sind.

Die Abhängigkeit Deutschlands und Europas von importierten Rohstoffen zeigt sich besonders deutlich bei Seltenen Erden. Nach Destatis kamen im Jahr 2024 65,5 Prozent der nach Deutschland importierten Menge Seltener Erden direkt aus China; einzelne Verbindungen und magnetrelevante Elemente waren noch stärker vom China-Import betroffen (Destatis 2025). Für 2025 meldete Destatis zwar einen Rückgang des China-Anteils an den deutschen Importen auf 55,4 Prozent,

zugleich aber weiterhin eine deutliche Importabhängigkeit; auch die EU importierte 2025 46,8 Prozent ihrer Seltenen Erden aus China (Destatis (2026)). Diese Zahlen sind Indikatoren für Konzentrationsrisiken. Sie bilden nicht alle Verarbeitungs- und Raffinationsstufen ab, zeigen aber, warum Diversifizierung, Substitution, Materialeffizienz und Recycling parallel verfolgt werden müssen.

Auch die Internationale Energieagentur beschreibt die Materialseite der Energiewende als strategischen Faktor. Im Global Critical Minerals Outlook 2025 wird auf die stark wachsende Nachfrage nach Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Seltenen Erden verwiesen. Zugleich betont die IEA, dass sich Raffination und Verarbeitung vieler kritischer Rohstoffe in den vergangenen Jahren weiter konzentriert haben; die durchschnittlichen Marktanteile der drei größten Raffinationsländer sind demnach gestiegen (IEA 2025a). Für die europäische Industrie ist daher nicht allein der Zugang zu Primärrohstoffen entscheidend. Ebenso wichtig sind sekundäre Rohstoffe, technische Substitution, standardisierte Stoffströme und regionale Verarbeitungskapazitäten.

5 Batterien als Kopplungselement von Mobilität und Energiesystem

Die Traktionsbatterie ist das zentrale Bauteil der Elektromobilität. Sie bestimmt Reichweite, Kosten, Gewicht, Ressourcenbedarf, Reparaturfähigkeit, Sicherheitsanforderungen und Wiederverwendungsmöglichkeiten. Gleichzeitig koppelt sie den Verkehrssektor mit dem Stromsystem. Elektrofahrzeuge sind nicht nur Verbraucher elektrischer Energie, sondern perspektivisch auch flexible Lasten und gegebenenfalls dezentrale Speicher. Intelligentes Laden, Lastmanagement und bidirektionale Anwendungen können Netzspitzen dämpfen, Strom aus Einkommensenergien besser integrieren und lokale Energiesysteme stabilisieren. Diese Potenziale entstehen aber nur, wenn Fahrzeugtechnik, Ladeinfrastruktur, Marktregeln und Datenzugang zusammenpassen.

Für die Rohstoffperspektive ist die Batterie-Kaskade entscheidend. In der ersten Nutzungsphase dient die Batterie als Traktionsspeicher im Fahrzeug. Nach Ende der Fahrzeugnutzung kann sie, sofern Zustand, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit dies zulassen, in einer zweiten Nutzungsphase stationär verwendet werden. Erst danach oder bei

fehlender Eignung folgt das stoffliche Recycling. Die Kaskade lautet daher nicht automatisch „Second Life vor Recycling“ im Sinne einer starren Priorität, sondern weitere Nutzung dort, wo sie sicher, ökologisch und systemisch sinnvoll ist; Recycling dort, wo hochwertige Rückgewinnung die bessere Option darstellt.

Damit diese Kaskade funktioniert, müssen Batterien aus der Black-Box-Logik herausgeführt werden. Recycler und Second-Life-Betreiber benötigen Informationen über Hersteller, Zellchemie, Produktionscharge, Nutzungsgeschichte, Sicherheitsereignisse und State of Health. Ohne solche Daten entstehen Mischströme, die vorsorglich nach dem ungünstigsten Fall behandelt werden müssen. Das erhöht Kosten, erschwert Transport und Demontage und reduziert die Chancen einer hochwertigen Wiederverwendung. Der digitale Batteriepass und andere Produktdateninstrumente sind deshalb keine bloße Bürokratie, sondern Teil der industriellen Infrastruktur für sichere Sortierung, Wiederverwendung und Rückgewinnung.

6 Batterierecycling als Rohstoff- und Industriepolitik

Batterierecycling ist nicht nur Abfallbehandlung. Es entscheidet mit darüber, ob Europa künftige Batteriewertschöpfungsketten beherrscht und ob ein Teil der strategischen Rohstoffe im regionalen Kreislauf gehalten werden kann. Lithium bleibt für die meisten heute absehbaren Lithium-Ionen-Bateriekonzepte zentral, auch wenn sich die Marktanteile einzelner Strategien zur Kathodenchemie ändern. Kobalt und Nickel sind je nach Zellchemie wert- und leistungsrelevant, während Kupfer als Querschnittsmetall für elektrische Leitungen, Zellen, Kabel, Ladeinfrastruktur und Netze unverzichtbar ist. Graphit und Mangan gewinnen ebenfalls an Bedeutung. Eine rohstoffpolitisch wirksame Kreislaufwirtschaft muss daher nicht nur Masse erfassen, sondern spezifizierte Qualität liefern.

Der entscheidende Unterschied liegt zwischen einfacher Rückgewinnung und materialeitiger Rückführung in hochwertige Anwendungen. Wenn Rezyklate nicht die Anforderungen für neue Batterien erfüllen, entstehen Downcycling-Pfade oder Verwertung außerhalb der Batterieproduktion. Für eine echte Kreislaufführung sind hingegen saubere Stoffströme, Rückverfolgbarkeit, Prozessstabilität, Qualitätsstandards und verlässliche Abnahme nötig. „Battery grade“ ist dabei

keine Marketingformel, sondern beschreibt die Eignung eines Materials für den erneuten Einsatz in Batteriezellen. Das setzt hohe Reinheitsgrade, kontrollierte Verunreinigungen und kompatible Spezifikationen voraus.

Die Recyclingkette umfasst mehrere Schritte: Sammlung und Rücknahme, sicherer Transport, Diagnose, Demontage, Vorbehandlung, Herstellung von Schwarzmasse, metallurgische Aufbereitung und schließlich die Herstellung marktfähiger Salze oder Materialien. Engpässe können in jedem dieser Schritte entstehen. Eine einzelne Anlage mit hoher Nennkapazität löst das Problem daher nicht. Entscheidend ist die Fähigkeit der gesamten Kette, Batterien unterschiedlicher Chemie, Bauform und Nutzungshistorie sicher zu erfassen, wirtschaftlich zu sortieren und aufzubereiten und die Rezyklate mit definierter Qualität zurückzuführen.

7 Europäisches Regelwerk: Kreislaufwirtschaft wird verbindlicher

Die EU hat in den vergangenen Jahren mehrere Rechtsakte auf den Weg gebracht, die die Kreislaufwirtschaft von einer strategischen Zielsetzung zu verbindlicher Marktordnung machen. Zentral ist die Verordnung (EU) 2023/1542 über Batterien und Altbatterien. Sie erfasst den Lebenszyklus von Batterien, enthält Vorgaben zu Nachhaltigkeit, Sicherheit, Kennzeichnung, Sorgfaltspflichten, Rücknahme, Recycling und Rezyklatanteilen und ist seit August 2023 in Kraft (EU 2023). Die Europäische Kommission beschreibt Batterien ausdrücklich als Schlüsseltechnologie für Klimaneutralität und Kreislaufwirtschaft; die neuen Regeln sollen den gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zu Sammlung, Recycling und Wiederverwendung erfassen (EU 2026a).

Für das Recycling sind insbesondere die Zielwerte zur Recyclingeffizienz, zur Rückgewinnung kritischer Materialien und zu Mindestanteilen recycelter Materialien relevant. Die Kommission veröffentlichte 2025 ergänzende Regeln zur Berechnung und Verifizierung von Recyclingeffizienz und Materialrückgewinnung. Danach sollen bis Ende 2027 unter anderem 90 Prozent von Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel sowie 50 Prozent von Lithium zurückgewonnen werden; bis Ende 2031 steigen diese Zielwerte auf 95 Prozent für Kobalt, Kupfer, Blei und

Nickel sowie 80 Prozent für Lithium (EU 2025). Solche Vorgaben verschieben Recycling von einer nachgelagerten Entsorgungsfrage in die Produktions- und Materialplanung.

Der Critical Raw Materials Act ergänzt diese Perspektive. Die EU setzt darin für 2030 Benchmarks entlang der Wertschöpfungskette: mindestens 10 Prozent des jährlichen EU-Bedarfs an strategischen Rohstoffen sollen aus EU-Förderung stammen, 40 Prozent aus Verarbeitung in der EU und 25 Prozent aus Recycling; zudem soll bei keinem strategischen Rohstoff mehr als 65 Prozent des EU-Bedarfs an einer relevanten Verarbeitungsstufe aus einem einzelnen Drittland stammen (EU 2026b). Damit wird Recycling ausdrücklich als Bestandteil strategischer Rohstoffsicherheit definiert. Die Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (ESPR) und digitale Produktpässe erweitern diese Logik auf Produktgestaltung, Reparierbarkeit, Rückbau und Datenverfügbarkeit (EU 2024).

Auf nationaler Ebene bildet die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie einen Orientierungsrahmen. Das Bundesumweltministerium beschreibt die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) als Methode, die alle Stationen des Kreislaufs berücksichtigt: Produktgestaltung, Materialauswahl, Produktion, möglichst lange Nutzung, Wiederverwendung und Recycling (BMUKN 2026b). Für Batterien bedeutet dies: Produktdesign, Rücknahmelogistik, Datenzugang, Genehmigungen, industrielle Skalierung und Nachfrage nach Rezyklaten müssen zusammen entwickelt werden. Andernfalls können zwar Einzelanlagen entstehen, der Kreislauf als industrielles System bleibt aber fragmentiert.

8 Recyclingkapazitäten: Zeitplanung, Rohstoffstoffsituation und Wertschöpfungskette

Die Diskussion über Batterierecycling wird häufig durch den Blick auf Anlagenkapazitäten verkürzt. Entscheidend ist jedoch das zeitliche Verhältnis zwischen Kapazitätsaufbau und verfügbarem Feedstock. In den 2020er Jahren stammt ein erheblicher Teil des Materials aus Produktionsausschuss und frühen Rückläufen. Große Mengen an End-of-Life-Traktionsbatterien entstehen erst zeitverzögert, weil Fahrzeugbatterien typischerweise viele Jahre im Einsatz bleiben. Daraus folgt ein zweiphasiges Risiko. Kurzfristig können Kapazitäten unterausgelastet sein;

mittelfristig kann bei stark steigendem Rücklauf eine nicht ausreichend koordinierte Kette zum Engpass werden.

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) weist in einem Update von 2025 darauf hin, dass öffentlich angekündigte europäische Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien kurzfristig über den prognostizierten Rücklaufmengen liegen können. Die installierte beziehungsweise angekündigte Vorbehandlungskapazität in Europa könnte demnach bis Ende 2026 auf rund 420 Kilotonnen pro Jahr steigen; für 2030 werden noch höhere Kapazitäten genannt. Zugleich betont das Fraunhofer-Institut, dass Nennkapazitäten, tatsächliche Auslastung, Recyclingtiefe und wirtschaftlicher Betrieb sorgfältig unterschieden werden müssen (ISI 2025a). Diese Differenzierung ist für die politische Bewertung wichtig, denn nicht jede angekündigte Tonne Kapazität bedeutet automatisch eine gesicherte Rückführung battery-grade-fähiger Materialien.

Studien von Agora Verkehrswende, Stiftung GRS Batterien und Öko-Institut betonen, dass Recycling von Antriebsbatterien über Abfallpolitik hinausgeht und eine strategische Frage der Rohstoffversorgung und industriellen Wettbewerbsfähigkeit ist. In einer 2025 veröffentlichten Studie wird ausgeführt, dass effiziente Kreislaufführung langfristig erhebliche Anteile des Rohstoffbedarfs der europäischen Automobilindustrie decken kann: bis 2040 bei Lithium bis zu einem Viertel, bei Nickel bis zu etwa der Hälfte und bei Kobalt über 60 Prozent (Agora 2025). Transport & Environment kommt in einer europäischen Analyse zu dem Ergebnis, dass End-of-Life-Batterien und Produktionsausschuss in Europa bereits 2030 relevante Anteile des Bedarfs an Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt decken könnten, weist jedoch zugleich auf Projektrisiken, Energiepreise, Finanzierung und technische Unsicherheiten hin (T&E 2024).

Daraus folgt, dass Recyclingkapazität notwendig, aber nicht hinreichend ist. Benötigt werden harmonisierte Standards, industrielle Datenräume, sichere Transportregeln, effiziente Genehmigungen, Rücknahmesysteme, Qualitätsnormen, Abnahmeverträge und ggf. passgenaue Förderinstrumente. Besonders kritisch ist der Übergang von Schwarzmasse zu raffinierten, spezifizierten Vorprodukten für die Zellfertigung. Dieser Schritt entscheidet darüber, ob Recycling die europäische Rohstoffresilienz tatsächlich stärkt oder ob wertvolle Zwischenprodukte exportiert und an anderer Stelle weiterverarbeitet werden.

9 Second Life: Nutzen, Grenzen und Steuerungsbedarf

Second-Life-Anwendungen können den Ressourcenbedarf senken, wenn sie die Nutzungsdauer von Batterien verlängern und zugleich einen realen Systemnutzen erzeugen. Die häufig geäußerte These, dass stark gefallene Kosten neuer Lithium-Ionen-Batterien die Wirtschaftlichkeit von Second-Life-Batterien grundsätzlich in Frage stellen, ist sachlich berechtigt, aber nicht abschließend. Die IEA beschreibt für 2024 einen Preisrückgang von Lithium-Ionen-Batteriepacks um 20 Prozent und verweist zugleich darauf, dass Recycling wegen begrenzter Rücklaufmengen erst mit zeitlichem Verzug einen erheblichen Beitrag zur Primärrohstoffentlastung leisten kann (IEA 2025b). BloombergNEF bezifferte den durchschnittlichen Preis von Lithium-Ionen-Batterien 2025 auf 108 US-Dollar je Kilowattstunde; stationäre Speicherpacks lagen im Durchschnitt bei etwa 70 US-Dollar je Kilowattstunde (BNEF 2025). Damit sinkt die maximal tragfähige Zahlungsbereitschaft für gebrauchte Traktionsbatterien deutlich. Second Life kann deshalb nicht mehr pauschal mit dem Hinweis auf früher hohe Batteriepreise begründet werden.

Gleichzeitig folgt daraus nicht, dass Second Life wirtschaftlich oder ökologisch überholt wäre. Entscheidend ist nicht der Neupreis allein, sondern die Vollkostenbetrachtung: Ankauf beziehungsweise Restwert, Diagnose, Demontage, Transport, Anpassung von Batteriemanagementsystem, Wechselrichter und Brandschutz, Genehmigung, Haftung, Gewährleistung, Netzanschluss und erzielbare Erlöse aus der jeweiligen Speicheranwendung. Wissenschaftliche Übersichten bewerten die Wirtschaftlichkeit von Second-Life-Batterien als stark abhängig von Strompreisen, Batteriepreisen, technischer Leistungsfähigkeit und konkretem Einsatzprofil (Dong/Liang/Li/Kim/Shen/Wallington 2023). Der Preisrückgang neuer LFP- und stationärer Speichersysteme verschärft den Wettbewerb also erheblich. Second Life bleibt vor allem dort robust, wo Batterien standardisiert, datenreich, sicher und möglichst ohne aufwendige Zerlegung auf Pack- oder Modulebene weiterverwendet werden können.

Der technische und ressourcenökonomische Grund für Second Life bleibt gleichwohl stark. Traktionsbatterien werden häufig nicht deshalb aus dem Fahrzeug genommen, weil sie energietechnisch unbrauchbar sind, sondern weil sie Anforderungen an Reichweite, Leistungsabgabe,

Garantie oder Fahrzeugwert nicht mehr erfüllen. In der Literatur wird der Übergang in eine Zweitnutzung häufig im Bereich von 70 bis 80 Prozent State of Health eingeordnet; Batterien, die mit 70 bis 80 Prozent ihrer ursprünglichen Kapazität in eine stationäre Anwendung starten, können dort unter geeigneten Bedingungen noch mehr als zehn Jahre genutzt werden (Zhu et al. 2021). Gerade wenn Batterien mit mindestens etwa 80 Prozent Restkapazität sicher diagnostiziert in Second-Life-Anwendungen eingebracht werden, bleibt ein erheblicher nutzbarer Energieinhalt erhalten. Eine direkte Zuführung zum Recycling ist nur dann die bessere Option, wenn Sicherheitszustand, Restlebensdauer, Datenlage oder Materialwert dies nahelegen.

Für das Stromsystem ist dieser Punkt relevant, weil mit wachsendem Anteil von Photovoltaik und Windenergie viele Kurzzeitspeicher benötigt werden. Batteriespeicher können nach Einschätzung der dena Preise stabilisieren, Systemdienstleistungen bereitstellen und Netze entlasten, wenn die richtigen Anreize, Betriebsvorgaben und Netzanschlussprozesse geschaffen werden (dena 2026). Second-Life-Batterien eignen sich besonders für Anwendungen mit moderaten Anforderungen an Energiedichte und Leistungsdynamik, wie Quartiers- und Gewerbespeicher, PV-Puffer, Ladeparks, Lastspitzenkappung, Microgrids, Notstromfunktionen sowie netzdienliche Kurzzeitspeicher. Sie ersetzen weder Langzeitspeicher noch Netzausbau, können aber als zusätzliche Flexibilitätsoption den Materialeinsatz neuer Batteriesysteme vermindern.

Die angemessene Schlussfolgerung lautet daher differenziert: Sinkende Neupreise verringern den Preisspielraum für Second-Life-Geschäftsmodelle, widerlegen aber nicht Second Life als Kaskadenprinzip. Ökonomisch sinnvoll ist Second Life, wenn Restkapazität, Datenlage, Sicherheit, Standardisierung und Skalierung so gut sind, dass die Vollkosten unter denen eines vergleichbaren Neuspeichers liegen oder ein zusätzlicher ökologischer und systemischer Nutzen erreicht wird. Politisch und regulatorisch sollte Second Life deshalb nicht schematisch vorgeschrieben werden. Sinnvoller ist ein Entscheidungsregime: Diagnose und Sicherheitsbewertung, Second Life bei geeigneten Batterien, unmittelbares Recycling bei ungeeigneten Batterien und gesichertes Endrecycling nach der Zweitnutzung. Um den volkswirtschaftlichen Nutzen zu generieren sollte über geeignete Förder-

instrumente nachgedacht werden. Der digitale Batteriepass, standardisierte Tests und klare Haftungsregeln sind dafür zentrale Voraussetzungen (ISI 2025b).

10 Schlussfolgerungen: Elektromobilität, Kreislaufwirtschaft und politische Konsistenz zusammendenken

Die Elektromobilität bleibt ein zentraler Effizienzpfad der Verkehrsdekarbonisierung. Sie ersetzt jedoch nicht die Notwendigkeit, Mobilität insgesamt ressourcenschonender zu organisieren. Eine nachhaltige Strategie verbindet direkte Elektrifizierung mit Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung, Sharing-Modellen, netzdienlicher Ladeinfrastruktur und hochwertigem Batterierecycling. Je stärker es gelingt, Mobilitätsleistung mit weniger Fahrzeugen und längerer Produktnutzung zu erbringen, desto geringer wird der Druck auf Rohstoffmärkte und Recyclingketten.

Für die politische Gestaltung ergeben sich daraus mehrere Prioritäten. Erstens müssen Ziele und Instrumente langfristig konsistent sein. Förderprogramme, gesetzliche Vorgaben und Übergangsfristen sollten so gestaltet werden, dass Haushalte, Kommunen und Industrie auf ihrer Basis investieren können. Zweitens müssen Kreislaufforderungen früh im Produktdesign beginnen. Batterien, Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur sollten so entwickelt werden, dass Demontage, Diagnose, Reparatur, Wiederverwendung und Recycling praktisch möglich sind. Drittens braucht es Datenzugang und digitale Produktpässe, die den Lebensweg von Batterien transparent machen. Viertens müssen Rezyklatmärkte stabilisiert werden, damit hochwertige Rückgewinnung nicht an fehlender Nachfrage oder unklaren Spezifikationen scheitert.

Fünftens sollte die Kaskadennutzung von Batterien als regulierte Entscheidungsfolge ausgestaltet werden. Geeignete Traktionsbatterien mit hoher Restkapazität sollten nicht vorschnell recycelt werden, sondern nach Diagnose, Sicherheitsprüfung und wirtschaftlicher Bewertung in stationäre Second-Life-Anwendungen gelangen. Batterien mit unzureichender Datenlage, kritischem Sicherheitszustand oder ungünstiger Restlebensdauer müssen dagegen unmittelbar dem hochwertigen Recycling zugeführt werden. So wird Second Life weder romantisiert

noch verworfen, sondern als konditionierter Baustein einer industriellen Kreislaufwirtschaft behandelt.

Die zentrale Schlussfolgerung lautet: Klimaschutz im Verkehr ist heute vor allem eine Organisationsaufgabe. Technik kann viel leisten, wenn politische Rahmenbedingungen verlässlich sind und Stoffkreisläufe industriell funktionieren. Batterierecycling ist dabei kein nachgelagerter Entsorgungsprozess, sondern Teil der künftigen Rohstoffversorgung. Es verbindet Klimaschutz, Industriepolitik, Versorgungssicherheit und Kreislaufwirtschaft. Eine 1:1-Elektrifizierung des bestehenden Mobilitätsmusters wäre deshalb zu kurz gegriffen. Tragfähig wird die Transformation erst, wenn Elektromobilität, neue Mobilitätskonzepte und geschlossene Materialkreisläufe als zusammenhängendes System gestaltet werden.

Bibliographie

- Agora (2025): Agora Verkehrswende / Stiftung GRS Batterien / Öko-Institut: „Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien“, Studie 2025.
<https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/stoffkreislaeufe-fuer-antriebsbatterien-studie>
- BAFA (2023) Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): „Umweltbonus endet mit Ablauf des 17. Dezember 2023“, Kurzmeldung vom 16.12.2023.
https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Elektromobilitaet/20231216_foerderende.html
- BMUKN (2026a): Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit: „Neues E-Auto-Förderprogramm mit sozialer Staffelung“, Pressemitteilung 2026.
<https://www.bundesumweltministerium.de/pressemitteilung/neue-s-e-auto-foerderprogramm-mit-sozialer-staffelung-zuschuesse-fuer-neuzulassungen-ab-1-januar-2026>
- BMUKN (2026b): Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS).
<https://www.bundesumweltministerium.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>
- BMWSB (2026): Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen / Bundesregierung: „Bundeskabinett beschließt

- Gebäudemodernisierungsgesetz“, Pressemitteilung vom 13.05.2026.
<https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/DE/2026/05/pm-gmodg.html>
- BNEF (2025): BloombergNEF: „New Record Lows for Battery Prices“, 19.12.2025. Durchschnittspreis Lithium-Ionen-Batterien 2025: 108 US-Dollar/kWh; stationäre Speicherpacks: 70 US-Dollar/kWh.
<https://about.bnef.com/insights/clean-transport/new-record-lows-for-battery-prices/>
- BReg (2026) Bundesregierung: „Deutschlandticket: Fragen und Antworten“, Stand 2026. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/deutschlandticket-2134074>
- dena (2026): Deutsche Energie-Agentur (dena): „Analyse - Großbatteriespeicher effizient integrieren“, 2026.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2026/Analyse_Grossbatteriespeicher_UA.pdf
- Destatis (2025): Statistisches Bundesamt (Destatis): „Ein Großteil der importierten Seltenen Erden kamen 2024 aus China“, Pressemitteilung Nr. N019 vom 23.04.2025.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/04/PD25_N019_51.html
- (Destatis (2026): Statistisches Bundesamt (Destatis): „Mehr als die Hälfte der importierten seltenen Erden kam 2025 aus China“, Pressemitteilung Nr. N023 vom 14.04.2026.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2026/04/PD26_N023_51.html
- Dong, Q.; Liang, S.; Li, J.; Kim, H. C.; Shen, W.; Wallington, T. J. (2023): „Cost, energy, and carbon footprint benefits of second-life electric vehicle battery use“, iScience, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107195>
- EU (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 über Batterien und Altbatterien. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>
- EU (2024): Verordnung (EU) 2024/1781 über Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte (ESPR) und digitalen Produktpass. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>
- EU (2025): Europäische Kommission: „New rules to boost recycling efficiency from waste batteries“, 04.07.2025.
https://environment.ec.europa.eu/news/new-rules-boost-recycling-efficiency-waste-batteries-2025-07-04_en

- EU (2026a): Europäische Kommission: „Batteries“ – Übersicht zur neuen EU-Batterieverordnung und Lebenszyklusansatz. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en (abgerufen am 20.05.2026)
- EU (2026b): Europäische Kommission: „European Critical Raw Materials Act“ – Benchmarks für 2030 und Diversifizierung. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en (abgerufen am 20.05.2026)
- GEG (2026): Bundesregierung: „Gesetz zum Erneuerbaren Heizen / Gebäudeenergiegesetz“. Darstellung der 65-Prozent-Regel, Übergangsfristen und Kopplung an kommunale Wärmeplanung. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/neues-gebäudeenergiegesetz-2184942> (abgerufen am 20.05.2026)
- GIZ (2026): Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ): „Mobility transition“ – Avoid-Shift-Improve als Leitprinzip nachhaltiger Mobilität. <https://www.giz.de/en/expertise/infrastructure/mobility-transition> (abgerufen am 20.05.2026)
- IEA (2025a): International Energy Agency (IEA): Global Critical Minerals Outlook 2025, Executive Summary. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/executive-summary>
- IEA (2025b): International Energy Agency (IEA): „Global EV Outlook 2025 - Electric vehicle batteries“. Darstellung der Entwicklung von Batteriekosten, Nachfrage und Recycling-Timing. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-batteries>
- ISI (2025a): Fraunhofer ISI: „Recycling capacities for lithium-ion batteries will exceed demand in Europe for the time being“, Battery Update, 24.07.2025. https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/batterie-recycling_europa_kapazitaeten_bedarf_update_2025.html
- ISI (2025b): Fraunhofer ISI: „Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf - Ein Update“, Policy Brief 01/2025. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/polic>

y-briefs/2025-

05_policy_brief_batterien_elektroautos_update_faktencheck_handlungsbedarf.pdf

T&E (2024): Transport & Environment: „From waste to value: the potential for battery recycling in Europe“, Report, Dezember 2024. <https://www.transportenvironment.org/articles/recycling-battery-metals-could-supply-up-to-a-quarter-of-europes-electric-cars-by-2030-study>

Zhu, Juner; Mathews, Ian; Ren, Dongsheng; Li, Wie; Congswell, Daniel; Xing, Bobin; Sedlatschek, Tobias; Nithin, Sai; Kantareddy, R.; Yi, Mengchao; Gao, Tao; Xia, Yong; Zhou, Qing; Wierzbicki, Tomasz; Bazant, Martin Z. (2021): „End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries“, Cell Reports Physical Science, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>

Rare Earths and European Supply Resilience: Lessons from Project Development Timelines and International Strategies

Melike Yildirim Ayyildiz, Jasemin A. Ölmez, Christoph Hilgers
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften

Abstract

The European Critical Raw Materials Act aims to strengthen the resilience of strategic raw material supply chains and reduce external dependencies for the European Union. Rare earth elements are essential for permanent magnets, renewable energy technologies, electric mobility, digital applications, and defence systems, making them a key component of the EU's industrial transformation. This contribution examines the relationship between the EU mining benchmarks, project-development realities, and international strategies for securing raw materials. Using the Norra Kärr rare earth project in Sweden as a case study, projected production capacities are compared with future EU demand scenarios on strategic rare earth elements. Particular attention is given to the influence of permission procedures, financing requirements, exploration risks, and mine-development lead times. The results indicate that policy objectives for domestic supply are constrained less by geological resource availability than by the long timescales required to transform mineral occurrences into operating mines. Examples from Japan, the United States, and China illustrate that the establishment of resilient rare earth supply chains typically requires long-term investment, downstream processing capabilities, and sustained political support. This contribution highlights that strengthening the EU's raw material resilience will depend on a combination of domestic resource development, strategic partnerships, geological exploration, and the expansion of industrial value chains beyond primary extraction.

Resümee

Der europäische Critical Raw Materials Act (CRMA) soll die Widerstandsfähigkeit von Rohstofflieferketten stärken und die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern reduzieren. Seltene Erden nehmen dabei eine Schlüsselrolle ein, da sie für Permanentmagnete, erneuerbare Energietechnologien, Elektromobilität, digitale Anwendungen und Verteidigungssysteme unverzichtbar sind. Der vorliegende Beitrag untersucht das Spannungsfeld zwischen den rohstoffpolitischen Richtwerten des CRMA, den tatsächlichen Entwicklungszeiten von Bergbauprojekten sowie internationalen Strategien zur Rohstoffsicherung. Am Beispiel des Seltene Erden Projekts Norra Kärr in Schweden werden potenzielle Fördermengen den zukünftigen Bedarfsentwicklungen der EU gegenübergestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei Genehmigungsprozesse, Finanzierungsanforderungen, geologische Unsicherheiten und Projektvorlaufzeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erreichung europäischer Rohstoffziele weniger durch die Verfügbarkeit geologischer Ressourcen als vielmehr durch die Dauer der Projektentwicklung begrenzt wird. Beispiele aus Japan, den USA und China verdeutlichen, dass der Aufbau belastbarer Lieferketten für Seltene Erden langfristige Investitionen, technologische Kompetenzen und politische Kontinuität erfordert. Der Beitrag zeigt, dass die europäische Rohstoffresilienz nur durch eine Kombination von heimischem Bergbau, strategischen Partnerschaften, verstärkter Exploration sowie dem Ausbau nachgelagerter Wertschöpfungsketten nachhaltig gestärkt werden kann.

Keywords/Schlüsselwörter

Critical Raw Materials Act, strategic raw materials, rare earth elements, supply chains, geopolitics;

Critical Raw Materials Act, Strategische Rohstoffe, Seltene Erden, Lieferketten, Geopolitik

1 Einleitung

Eine sichere und nachhaltige Rohstoffversorgung ist von zentraler Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung der Europäischen Union (EU) sowie für die Sicherung von Beschäftigung, Wettbewerbsfähigkeit und Lebensstandard (European Commission 2024). Ausgewählte Rohstoffe gelten aufgrund ihrer hohen wirtschaftlichen Bedeutung bei gleichzeitig erhöhtem Versorgungsrisiko als besonders kritisch (European Commission 2024). Im Mai 2024 trat der European Critical Raw

Materials Act (CRMA, EU-Verordnung (EU) 2024/1252) in Kraft, um die Transformationsziele der EU zu unterstützen (European Commission 2023, European Commission 2025, European Commission Directorate-General for Internal Market Industry Entrepreneurship and SMEs n.d.). Ziel des CRMA ist es, die Versorgung der EU mit kritischen und strategischen Rohstoffen auszubauen und zu diversifizieren, die Kreislaufwirtschaft einschließlich des Recyclings zu stärken sowie Forschung und Innovation zur Ressourceneffizienz und zur Entwicklung von Substitutionsmaterialien zu fördern (European Commission 2025). Kritische Rohstoffe werden als jene Rohstoffe definiert, die sowohl von hoher wirtschaftlicher Bedeutung sind als auch ein erhöhtes Risiko in ihren Lieferketten aufweisen (European Parliament Council of the European Union 2024). Strategische Rohstoffe erfüllen dieselben Kriterien, sind darüber hinaus jedoch für strategische Technologien und Zukunftsindustrien, etwa in den Bereichen Verteidigung, Luft- und Raumfahrt sowie Energiewende, von besonderer Relevanz (European Parliament Council of the European Union 2024).

Die EU verfolgt mit dem CRMA das Ziel, die gesamte Wertschöpfungskette strategischer Rohstoffe zu stärken und die Versorgungssicherheit langfristig zu erhöhen (European Commission 2025). Hierzu wurden für das Jahr 2030 folgende Richtwerte festgelegt:

- a) Die Rohstoffgewinnung innerhalb der EU soll mindestens 10% des jährlichen Bedarfs an strategischen Rohstoffen der EU decken,
- b) die Verarbeitungskapazitäten sollen auf mindestens 40% des jährlichen Verbrauchs ausgebaut werden, und
- c) mindestens 25% des Bedarfs sollen durch Recycling gedeckt werden (European Commission 2025). Zusätzlich soll die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern reduziert werden, indem sich
- d) die Versorgung mit strategischen Rohstoffen auf mehrere Herkunftsländer stützt und nicht mehr als 65% des jährlichen Verbrauchs der EU eines strategischen Rohstoffs aus einem einzigen Drittstaat stammt (European Commission 2025).

Zu den strategischen Rohstoffen der EU gehören unter anderem Seltenerdmetalle für Dauermagnete (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm und Ce) (European Parliament Council of the European Union 2024). Die strategische Bedeutung Seltener Erden spiegelt sich auch darin wider, dass sie in anderen Industrienationen, wie den USA und Südkorea, als kritische Rohstoffe klassifiziert werden (South Korean Ministry of Trade Industry and Energy 2023, USGS Mineral Resources Program 2025). Aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften werden

sie für zahlreiche Zukunftstechnologien, beispielsweise für Permanentmagnete für Elektrofahrzeuge und Windkraftanlagen für elektronische Endgeräte benötigt (Schönfeldt et al. 2024).

Die Gruppe der Seltenen Erden umfasst 17 Elemente, darunter die Lanthanoide von Lanthan (La) bis Lutetium (Lu) sowie Scandium (Sc) und Yttrium (Y). Auf Basis ihrer Atomgewichte werden sie in leichte (LREE) und schwere Seltene Erden (HREE) unterteilt (Van Gosen et al. 2017). Die Kritikalität einzelner Seltenerdelemente wird maßgeblich durch ihre industrielle Nutzung bestimmt. Beispielsweise werden Neodym (Nd) und Praseodym (Pr) trotz ihrer Zugehörigkeit zu den LREE aufgrund ihrer Bedeutung für Permanentmagnete kritischer eingestuft als das HREE Gadolinium (Gd) (Guyonnet et al. 2015).

Im Gegensatz zu bisherigen Studien, die sich primär auf die quantitative Bewertung potenzieller Fördermengen konzentrieren, steht in diesem Beitrag die Frage im Vordergrund, inwieweit die politischen Richtwerte des CRMA mit den tatsächlichen Entwicklungszyklen von Bergbauprojekten vereinbar sind. Neben einer probabilistischen Bewertung potenzieller Fördermengen werden strukturelle Einflussfaktoren wie Genehmigungsprozesse, Projektvorlaufzeiten, Finanzierungsbedingungen und internationale Rohstoffstrategien berücksichtigt. Das Seltene Erden Projekt Norra Kärr in Schweden dient dabei als Fallbeispiel zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen politisch formulierten Richtwerten und den praktischen Rahmenbedingungen der Rohstoffgewinnung. Darüber hinaus wird analysiert, welche Erkenntnisse sich aus den Rohstoffstrategien anderer Industrienationen, insbesondere Japans und der Vereinigten Staaten, für die europäische Rohstoffpolitik ableiten lassen. Der Beitrag verbindet damit quantitative Szenarioanalysen mit einer strategischen Einordnung aktueller Entwicklungen entlang globaler Wertschöpfungsketten für Seltene Erden.

2 Methodik

Der vorliegende Beitrag kombiniert Ergebnisse einer probabilistischen Szenarioanalyse mit einer strategischen Analyse von Projektentwicklungsrisiken und internationalen Rohstoffstrategien. Die quantitativen Berechnungen basieren auf einer bereits publizierten Modellierung des Norra Kärr Projekts (Yildirim Ayyildiz et al. 2026), werden jedoch durch zusätzliche Betrachtungen zu Vorlaufzeiten von Bergbauprojekten, Finanzierungsbedingungen sowie geopolitischen Entwicklungen erweitert.

Zur Abschätzung möglicher Produktionsentwicklungen werden verschiedene Nachfrageszenarien für Seltene Erden den öffentlich verfügbaren Projektdaten gegenübergestellt. Darüber hinaus werden internationale Fallbeispiele aus Japan, Australien und den USA herangezogen, um Erfolgsfaktoren und zeitliche Anforderungen beim Aufbau resilienter Lieferketten zu analysieren.

Die angenommenen Unsicherheiten für die Szenarienbetrachtung basieren auf dem PERC-Standard (Pan-European Reserves & Resources Reporting Committee) (PERC 2021), während die zukünftigen Nachfrageszenarien auf Carrara et al. (2023) und der European Climate Infrastructure and Environment Executive Agency (2025) basieren. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik findet sich in Yildirim Ayyildiz et al. (2026).

3 Ergebnisse

Die Analyse zeigt, dass die Erreichung der CRMA Richtwerte für den Bergbau von 10% des prognostizierten Bedarfs der Europäischen Union nicht allein von der Existenz wirtschaftlich nutzbarer Lagerstätten abhängt (Yildirim Ayyildiz et al. 2026). Vielmehr bestimmen Genehmigungsverfahren, Vorlaufzeiten, Kapitalverfügbarkeit und technische Entwicklungsschritte maßgeblich den Zeitpunkt einer möglichen Rohstoffproduktion.

Die probabilistische Szenarioanalyse des Projekts Norra Kärr deutet darauf hin, dass die geplanten Fördermengen grundsätzlich einen Beitrag zur europäischen Versorgung mit strategischen Seltenen Erden leisten könnten (Yildirim Ayyildiz et al. 2026). Unter idealisierten Annahmen wäre eine Beteiligung an der Erreichung des CRMA Richtwertes grundsätzlich möglich (Yildirim Ayyildiz et al. 2026). Werden jedoch realistische Projektlaufzeiten berücksichtigt, verschiebt sich ein potenzieller Produktionsbeginn über den Zielhorizont des Jahres 2030 hinaus (Yildirim Ayyildiz et al. 2026). Die Ergebnisse verdeutlichen damit die Bedeutung nicht-geologischer Faktoren für die europäische Rohstoffversorgung.

Zur Berücksichtigung realistischer Projektlaufzeiten wurde in die Simulation eine für das Eisenerzprojekt Kallak in Schweden dokumentierte Vorlaufzeit von neun Jahren integriert (Johnson et al. 2023 und darin zitierte Quellen, Näringsdepartementet 2022). Unter dieser Annahme wäre ein Produktionsbeginn frühestens in den Jahren 2034 bzw. 2035 zu erwarten (Yildirim Ayyildiz et al. 2026). Selbst bei hohen Fördermengen

kann der CRMA Richtwert für 2030 nicht erreicht werden, wenn die Produktion aufgrund projektbedingter Vorlaufzeiten erst nach 2030 beginnt (Yildirim Ayyildiz et al. 2026). Damit stellt die Projektdauer einen der zentralen Risikofaktoren für die Erreichung der europäischen Rohstoffziele dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erfüllung des Richtwertes von 10% für den heimischen Bergbau für Seltene Erden bis 2030 unter diesen Bedingungen sowie unter Berücksichtigung der Fallstudie Norra Kärr theoretisch nicht realisierbar und bei einer angenommenen Vorlaufzeit von neun Jahren bis 2030 kein Produktionsbeginn zu erwarten ist (Yildirim Ayyildiz et al. 2026).

3.1 Entwicklungszeiten und Herausforderungen im Bergbau

Eine zentrale Herausforderung für den Bergbau in der EU stellen die Dauer und die Komplexität der Genehmigungsverfahren dar (Streit et al. 2025). Die geologische Exploration, die Ressourcenschätzung sowie der Übergang in die Produktionsphase bilden einen langwierigen Prozess (Manalo 2025). Bergbauprojekte durchlaufen dabei einen vielschichtigen Entwicklungsweg von der ersten Exploration und Lagerstättenentdeckung bis zur Inbetriebnahme einer Mine. Der zeitliche Aufwand hat in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen (Zadeh 2025): Die durchschnittliche Zeitspanne zwischen Exploration und Produktionsaufnahme beträgt beispielsweise in Finnland 15 bis 25 Jahre und in Portugal 15 bis 20 Jahre (OECD 2025 und die darin zitierten Quellen). Während die durchschnittliche Vorlaufzeit für Bergbauprojekte weltweit zwischen den Jahren 2000 und 2009 noch 10,6 Jahre betrug, stieg sie für Projekte, die zwischen 2020 und 2024 entwickelt wurden, auf 17,8 Jahre an (Manalo 2025). Diese Entwicklung ist unter anderem auf steigende Projektkosten, Einflussfaktoren wie strengere Umwelt- und Sozialstandards, ein wachsender Kapitalbedarf und die Volatilität der Rohstoffmärkte zurückzuführen (Zadeh 2025). Selbst in Ländern mit bedeutenden Lagerstättenvorkommen können diese Faktoren die Projektentwicklung erschweren. So verfügt Australien über die weltweit drittgrößten Reserven an Seltenen Erden, dennoch stellt die Finanzierung von Projekten für viele Produzenten von Seltenen Erden weiterhin eine erhebliche Herausforderung dar (Minerals Council of Australia 2020, USGS 2026).

Da Projekte im Bereich kritischer Rohstoffe häufig mit geologischen, regulatorischen, technischen und marktbezogenen Unsicherheiten verbunden sind, bewerten Geschäftsbanken deren Finanzierung oftmals als risikoreich. Unternehmen sind daher insbesondere in frühen Projektphasen auf alternative Finanzierungsquellen wie Eigenkapitalinvestoren, staatliche Förderprogramme oder strategische Industriepartner angewiesen. Diese Finanzierungsformen können jedoch zusätzliche Kosten, höhere Komplexität sowie weitergehende Anforderungen an die Projektentwicklung mit sich bringen (Ashton et al. 2026, Corke 2021).

Außerdem kann auch die öffentliche Finanzierung durch restriktive Fördervorgaben eingeschränkt sein. So unterstützen einige Fonds wie der NAIF (Northern Australia Infrastructure Facility) ausschließlich bergbaubezogene Infrastrukturinvestitionen und nicht die eigentlichen Bergbauaktivitäten, was die Projektstrukturierung zusätzlich erschweren kann (Corke 2021). Darüber hinaus führt nicht jedes Explorationsprojekt letztlich zur Inbetriebnahme einer Mine. Eine Analyse von 4.676 Explorationsprojekten, z. B. für Seltene Erden und andere Rohstoffe in niedrigeren Konzentrationen, aus dem Zeitraum 1950 bis 2016 zeigte, dass lediglich 2.120 Projekte, entsprechend rund 45%, in produzierende Bergwerke überführt wurden (Schodde 2017). Für diese Projekte betrug die durchschnittliche Entwicklungsdauer etwa zwölf Jahre (Schodde 2017). Gleichzeitig ist ein rückläufiger Trend bei der tatsächlichen Umsetzung von Lagerstättenentdeckungen in aktiven Bergbau zu beobachten. Während für den Zeitraum 1950 bis 1959 noch 72% in reale Bergwerksprojekte überführt wurden, lag die Zahl zwischen 2000 und 2016 nur noch bei 18% (Schodde 2017). Insgesamt weisen größere Lagerstätten eine höhere Wahrscheinlichkeit auf, erschlossen zu werden und größere Lagerstätten werden in der Regel schneller in Produktion gebracht als kleinere Vorkommen (Schodde 2017, Schodde 2025).

Innovationen in Bergbautechnologien und betrieblichen Verfahren können dazu beitragen, Vorlaufzeiten zu verkürzen, indem sie die Effizienz und Effektivität von Exploration und Rohstoffgewinnung steigern (Kuhanathan 2024).

Für einige Länder der EU kommt zudem hinzu, dass aufgrund unzureichender Erkundung, lückenhafter Datengrundlagen sowie technischer und geologischer Einschränkungen bislang keine umfassende Bewertung des geologischen Rohstoffpotenzials vorliegt (Ölmez and Hilgers 2026). Bergbauprojekte werden aufgrund struktureller Herausforderungen, hoher Energiekosten, der Volatilität von Rohstoffpreisen sowie potenzieller Fachkräftengpässe häufig als risikobehaftet und für Investoren

vergleichsweise wenig attraktiv wahrgenommen (Ölmez and Hilgers 2026).

3.2 Auswahl an Strategien zur Rohstoffversorgung von Industrienationen

Weitere industrialisierte Volkswirtschaften wie China, die USA, Japan, Südkorea und Australien verfolgen unterschiedliche Strategien zur Sicherung ihrer Versorgung mit kritischen Rohstoffen wie etwa Seltenen Erden (Barteková and Kemp 2016, Baskaran and Schwartz 2026, Chen et al. 2024). Zu diesen Strategien zählen der Aufbau staatlicher strategischer Rohstoffvorräte, Investitionen in inländische und ausländische Rohstoffprojekte, Rohstoffabkommen, international operierende Rohstofffirmen und Raffination sowie Maßnahmen zum Schutz und zur Sicherung von Rohstoffressourcen (Barteková and Kemp 2016).

Der global bedeutendste Produzent und Verarbeiter von Seltenen Erden ist China, daneben investieren aber auch die USA, Australien und Japan umfangreich in den Ausbau der Bergbau- und Raffinierungskapazitäten (z. B. Dong et al. 2017, Lasley 2023, Yean and Rebecca 2023). China dominiert mit etwa 70% den Bergbau auf Seltene Erden, mit 80-90% die Trennung und Raffination der Seltenen Erden und mit über 90% die globale Produktion von Seltenerdsmagneten (NdFeB und SmCo) (Hage Chahine et al. 2025). Seltenerdsmagnete werden u. a. für die E-Mobilität, Verbraucherelektronik, Industrieroboter, Drohnen und Verteidigungssysteme benötigt. Seit 2025 unterliegt der Export von Seltenen Erden und Seltenerdsmagneten nach Europa einer Dual-Use Exportkontrolle und einer Lizenzierung; im Juli 2026 wurden zudem 14 europäische Firmen von Belieferung ausgeschlossen (z. B. Rheinmetall, Sindlhauser Materials GmbH) (Sadden 2026). Als Begründung nannte das chinesische Handelsministerium den Schutz der nationalen Sicherheit (Sadden 2026).

In den USA entwickelt MP Materials Corp. (NYSE-Marktkapitalisierung ca. 8 Mrd. USD) neben ihrer Seltene Erden Mine Mountain Pass in Kalifornien ebendort die chemisch und energetisch aufwendige Separation und Raffination, unterstützt durch staatliche Investitionen und ein 10-jähriges Offtake Agreement mit Preisuntergrenze des US Department of War (CNN Business 2026, MP Materials 2025). Dazu trägt die in Hanau (DE) angesiedelte Vacuumschmelze GmbH & Co KG, im Juni 2026 vom US-Rohstoffkonzern Energy Fuel für etwa 1,9 Mrd. USD übernommen, nun verstärkt in den USA bei (Evelyn 2026). Als eine der

wenigen westlichen Firmen verfügt sie über die Kompetenz, aus dem Rohstoff hochwertige Produkte wie Seltenerd-magnete zu fertigen.

Japan zählt global betrachtet zu den größten Verbrauchern von Seltenen Erden, unter anderem aufgrund seines Anteils von rund 22% an der weltweiten Produktion von NdFeB-Permanentmagneten und verfolgt die Strategie gezielter Investitionen in ausländische Projekte zur Gewinnung Seltener Erden (z. B. JOGMEC 2011, JOGMEC 2022, Nkiawete and Vander Wal 2025, USGS 2026). Der Handelskonflikt mit China im Jahr 2010 veranlasste Japan, seine Rohstoffdiversifizierungsstrategie zu intensivieren. In diesem Zusammenhang investierte das Land in australische Projekte für Seltene Erden und unterstützte bereits 2011 ein australisches Bergbauunternehmen finanziell (JOGMEC 2011). Der Anteil der japanischen Importe Seltener Erden aus China sank von 81% im Jahr 2010 auf 64% im Jahr 2023 für die HS Codes (2846, 280530) (UN Comtrade Database 2025a, UN Comtrade Database 2025b, UN Comtrade Database 2025c, UN Comtrade Database 2025d). Neben finanziellen Investitionen leistete Japan zudem technische Unterstützung für internationale Projekte im Bereich der Seltenen Erden, wie etwa die Bereitstellung geologischer Expertise sowie den Einsatz von Fachpersonal zur Unterstützung der Projektentwicklung und des Wissenstransfers (JOGMEC 2022). In Australien investierte Japans Sojitz Corp. und JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) in 2011 250 Mio. USD über das japanisch-australische Joint Venture Japan-Australia-Rare-Earth in die australische Lynas Rare Earths Ltd., zu der die australische Mine Mt. Weld Mining Ltd und die Raffination in Malaysia gehört (Sojitz 2026). Die Investitionen wurden 2022 um 9 Mio. USD und 2023 um 134 Mio. USD erhöht (Jain and Obayashi 2023, Obayashi 2022). Das Beispiel verdeutlicht, dass die Diversifizierung von Lieferketten langfristig möglich ist, jedoch Zeiträume erfordert, die deutlich über geplante Zeiträume des CRMA bis 2030 hinausgehen.

In Deutschland wird die vertikale Integration von Wertschöpfungsketten in geringerem Umfang als in Japan und den USA vorangetrieben und der Schwerpunkt bislang bei den Industrieunternehmen gesehen. Der deutsche Rohstofffonds, finanziert durch den Bund und verwaltet durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), wird sich laut Pressemitteilung des Bundeswirtschaftsministeriums vom April 2026 mit bis zu 50 Mio. € am Nolans Projekt der Arafura Rare Earth Ltd. in Australien beteiligen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2026). Neben diesen im Vergleich zu Japan und USA geringen internationalen Investitionen Deutschlands wurden die großen, international

tätigen deutschen Bergbauaktivitäten nach Umstrukturierung von Metallgesellschaft (heute GEA) und Preussag (heute TUI) bereits Ende der 1990er Jahre veräußert (Encyclopedia 2018, GEA 2025).

Die chemisch und energetisch aufwendige Separation, Raffination und Herstellung von Seltenerd-magneten verlagerte sich nach China, wo die Prozesse erfolgreich weiterentwickelt wurden. Die weiterhin ins außereuropäische Ausland verlagerten Kapazitäten lassen befürchten, dass im Wettbewerb um Rohstoffe mit Ländern wie China, den USA, Japan und Südkorea, Deutschland und Europa weiterhin vor Herausforderungen stehen.

4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass die langfristige Versorgung der EU mit Seltenen Erden nicht ausschließlich eine Frage geologischer Verfügbarkeit ist. Entscheidend sind vielmehr die Zeiträume, die zwischen Exploration, Genehmigung, Finanzierung, Bau und Produktionsaufnahme eines Bergbauprojekts liegen. Diese Entwicklungszyklen überschreiten häufig die politischen Planungshorizonte des CRMA.

Das Beispiel Norra Kärr verdeutlicht, dass selbst vielversprechende Projekte nur dann einen Beitrag zur Versorgung mit strategischen Rohstoffen leisten können, wenn regulatorische, technische und finanzielle Voraussetzungen rechtzeitig geschaffen werden. Gleichzeitig zeigen die Beispiele Japans, Australiens und der USA, dass der Aufbau resilienter Lieferketten nicht allein auf Bergbau basiert, sondern strategische Investitionen in Verarbeitung, Raffination, Technologieentwicklung und internationale Partnerschaften erfordert. Für die EU ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer langfristigen Rohstoffstrategie, die geologische Exploration, Projektentwicklung, industrielle Wertschöpfung und internationale Kooperation gleichermaßen berücksichtigt. Die Stärkung der Versorgungssicherheit für Seltene Erden wird daher weniger durch einzelne Bergbauprojekte als durch ein koordiniertes Zusammenspiel entlang der gesamten Wertschöpfungskette bestimmt.

Danksagung

Die Forschung von Yildirim Ayyildiz wird vom kooperativen Promotionskolleg KLIREC (Klima, Ressourcen und Circular Economy – Wechselbeziehungen, Synergien und Tradeoffs) der HS Pforzheim und des KIT finanziert.

Bemerkung

Teile der quantitativen Datengrundlage und der probabilistischen Szenarioanalyse basieren auf den Ergebnissen von Yildirim Ayyildiz et al. (2026). Für den vorliegenden Beitrag wurden diese Ergebnisse in komprimierter Form dargestellt und in einen erweiterten rohstoffpolitischen Kontext eingeordnet. Darüber hinaus wurde die Analyse durch zusätzliche Betrachtungen zu Projektvorlaufzeiten, Finanzierungsbedingungen, internationalen Rohstoffstrategien, geopolitischen Entwicklungen sowie europäischen und außereuropäischen Wertschöpfungsketten ergänzt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher nicht auf der Wiederholung der ursprünglichen Modellierung, sondern auf der strategischen Bewertung der Herausforderungen und Handlungsmöglichkeiten zur Sicherung der Versorgung mit Seltenen Erden in Europa.

Bibliografie

- Ashton, Charles; Farnsworth, Ben; Aldus, Rod; Hedge, John; Bogdanich, Igor; Wong, Andrew; Ninkov, Alexander; Doyle, Darcy; Morris, Emma; Bremer, Lennard (2026): *Critical minerals in 2026: the rise of rare earths and lessons from the lithium boom*. Allens.
<https://www.allens.com.au/insights-news/insights/2026/01/critical-minerals-in-2026-the-rise-of-rare-earths-and-lessons-from-the-lithium-boom/>. (30.07.2026).
- August, Mathew (2026): *Breaking China's Rare Earth Hegemony*.
<https://www.defensedaily.com/commentary/breaking-chinas-rare-earth-hegemony/>. (05.08.2026).
- Barteková, Eva; Kemp, Rene (2016): „National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions“. *Resources Policy* 49, 153-164.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.05.003>.
- Baskaran, Gracelin; Schwartz, Meredith (2026): „Rare Earth Export Restrictions - One Year Later“. *CSIS Briefs* 8.
<https://www.csis.org/analysis/rare-earth-export-restrictions-one-year-later>. (05.08.2026)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2026): *Rohstofffonds beteiligt sich am australischen Nolans-Projekt zur Sicherung Seltener Erden*.
<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2026/04/20260401-rohstofffonds-beteiligt-sich->

am-australischen-nolans-projekt-zur-sicherung-seltener-erden.html. (05.08.2026).

- Carrara, Samuel; Bobba, Silvia; Blagoeva, Darina; Alves Dias, Patricia; Cavalli, Alessandro; Georgitzikis, Konstantinos; Grohol, Milan; Itul, Anca; Kuzov, Teodor; Latunussa, Cynthia; Lyons, Lorcan; Malano, Giorgia; Maury, Thibaut; Prior Arce, Angel; Somers, Julian; Telsnig, Thomas; Veeh, Constanze; Wittmer, Dominic; Black, Catriona; Pennington, David; Christou, Michail (2023): „Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study“. *JRC132889*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/386650>.
- Chen, Wei-Qiang; Eckelman, Matthew J; Sprecher, Benjamin; Chen, Wie; Wang, Peng (2024): „Interdependence in rare earth element supply between China and the United States helps stabilize global supply chains“. *One Earth* 7, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.011>
- CNN Business (2026): *MP Materials Corp Class A*. <https://edition.cnn.com/markets/stocks/MP>. (05.08.2026).
- Corke, Clarke (2021): *Funding critical mineral and rare earth projects in Australia*. <https://www.corrs.com.au/insights/funding-critical-mineral-and-rare-earth-projects-in-australia>. (30.07.2026).
- Dong, Shengzhi; Li, Wei; Chen, Hongsheng; Han, Rui (2017): „The status of Chinese permanent magnet industry and R&D activities“. *AIP Advances* 7, 056237. <https://doi.org/10.1063/1.4978699>.
- Encyclopedia (2018): *Preussag AG - International Directory of Company Histories*. <https://www.encyclopedia.com/social-sciences-and-law/economics-business-and-labor/businesses-and-occupations/preussag-ag> (05.08.2026).
- European Climate Infrastructure and Environment Executive Agency (2025): *LIFE INSPIREE: mining for valuable metals in our waste at large scale*. https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/life-inspiree-mining-valuable-metals-our-waste-large-scale-2025-04-28_en. (30.04.2025).
- European Commission (2023): *Questions and Answers on the European Critical Raw Materials Act*. Brussels. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/mt/qanda_23_1662 (15.01.2025).

- European Commission (2024): *Critical and Strategic Materials*. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>. (09.09.2024).
- European Commission (2025): *An EU critical raw materials act for the future of EU supply chains*. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/> (15.06.2025).
- European Commission Directorate-General for Internal Market Industry Entrepreneurship and SMEs (n.d): *European Critical Raw Materials Board*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act/board_en. (13.05.2026).
- European Parliament Council of the European Union (2024): „Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020“. Directorate-General for Internal Market Industry Entrepreneurship and SMEs. PE/78/2023/REV/1.
- Evelyn, Sebastian (2026): „Energy Fuels acquires German magnet maker VAC for \$1.9 bln“. *Fastmarkets* (05.08.2026).
- GEA (2025): *Our heritage*. <https://www.gea.com/en/about-us/our-heritage/> (05.08.2026).
- Guyonnet, Dominique; Planchon, Mariane; Rollat, Alain; Escalon, Victoire; Tuduri, Johann; Charles, Nicolas; Vaxelaire, Stephane; Dubois, Didier; Fargier, Helene (2015): „Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe“. *Journal of Cleaner Production* 107, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.123>
- Hage Chahine, Amer; Epikhin, Ilya; Kaznacheev, Peter; Ghi, Trung; Hirakawa, Kiseki (2025): „The Rare Earth Imperative - How market dynamics & geopolitics drive diverse investment pathways“. *Arthur D Little* 36. <https://www.adlittle.com/sites/default/files/reports/ADL%20The%20rare%20earth%20imperative%202025.pdf>. (04.08.2026).
- Jain, Echha; Obayashi, Yuka (2023): *Australia's Lynas Rare Earths gets \$134 mln funding from Japan to boost output*. <https://www.reuters.com/markets/commodities/australias-lynas-rare-earths-gets-134-mln-funding-japan-boost-output-2023-03-07/>. (05.08.2026).

- JOGMEC (2011): *Sojitz and JOGMEC enter into Definitive Agreements with Lynas Including Availability Agreement to secure supply of Rare Earths products to Japanese Market*.
<https://www.jogmec.go.jp/english/news/release/release0069.html>
 (29.01.2025).
- JOGMEC (2022): *JARE Supports Lynas' Development with Additional Equity Investment*.
https://www.jogmec.go.jp/english/news/release/news_10_00010.html
 (28.01.2025).
- Johnson, Eva L.; Ericsson, Magnus; Löf, Anton (2023): „The mining permitting process in selected developed economies“. *Land Use Policy* 131, 106762.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106762>.
- Kuhanathan, Ano (2024): „Metals and mining: Do we live in a material world?“. *Allianz Research* 21.
https://www.allianz.com/en/economic_research/insights/publications/specials_fmo/240723-metals-energy-transition.html
 (05.08.2026)
- Lasley, Shane (2023): *DOD to invest \$258M in Texas REE plant*.
<https://www.metaltechnews.com/story/2023/08/02/tech-metals/dod-to-invest-258m-in-texas-ree-plant/1402.html>.
 (11.07.2025).
- Manalo, Paul (2025): *From 6 years to 18 years: The increasing trend of mine lead times*. <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/from-6years-to-18years-the-increasing-trend-of-mine-lead-times>. (30.08.2025).
- Minerals Council of Australia (2020): *Commodity Demand Outlook 2030*. *Minerals Council of Australia* 34. <https://minerals.org.au/wp-content/uploads/2022/12/Commodity-Outlook-2030.pdf>.
 (05.08.2026).
- MP Materials (2025): *MP Materials Announces Transformational Public-Private Partnership with the Department of Defense to Accelerate U.S. Rare Earth Magnet Independence*. <https://mpmaterials.com/news/mp-materials-announces-transformational-public-private-partnership-with-the-department-of-defense-to-accelerate-u-s-rare-earth-magnet-independence>. (11.05.2026).
- Näringsdepartementet (2022): *Regeringen beviljar bearbetningskoncession för Kallak K nr 1*.
<https://jokkmokkiron.se/upload/images/dokument/presentations>

- bilder-regeringen-beviljar-bearbetningskoncession-for-kallak-k-nr-157.pdf. (25.12.2025).
- Nkiawete, Mpila M; Vander Wal, Randy L. (2025): „Rare earth elements: Sector allocations and supply chain considerations“. *Journal of Rare Earths* 43, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.01.020>.
- Obayashi, Yuka (2022): *Japan's JOGMEC, Sojitz invest \$9 million in rare-earth's miner Lynas*. <https://www.reuters.com/markets/commodities/japans-jogmec-sojitz-invest-9-mln-rare-earth-miner-lynas-2022-09-20/>. (05.08.2026).
- OECD (2025): *Enhancing Regional Mining Ecosystems in the European Union: Securing the Green Transition and Supply of Mineral Raw Materials*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/97ba1224-en>.
- Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph (2026): „Gewinnung Heimischer Strategischer Rohstoffe Im Krisenfall“. *Thinktank Industrielle Ressourcenstrategien* 79. <https://doi.org/10.5445/IR/1000193074>.
- PERC (2021): „PERC Reporting Standard“. *Pan-European Standard for the Public Reporting of Exploration Results*. Brussels: Mineral Resources and Mineral Reserves.
- Sadden, Euan (2026): *China bans rare earth exports to 14 European companies*. <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/metals/072426-china-bans-rare-earth-exports-to-14-european-companies>. (05.08.2026).
- Schodde, Richard (2017): *Time Delay Between Discovery And Development – Is It Getting More Difficult?*. Tianjin, China: China Mining Conference, 19.
- Schodde, Richard (2025): „Mineral Deposit Exploration – Discovery Trends: 1900-2023“. *SEG Discovery*, 19-35. <https://doi.org/10.5382/Geo-and-Mining-28>
- Schönfeldt, Mario; Diehl, Oliver; Gassman, Jürgen (2024): „Recycling of NdFeB magnets in Germany“. Berlin: DERA Rohstoffinformationen 60. 45 <https://doi.org/10.25928/snny-yk95>.
- Sojitz (2026): *Sojitz's Rare Earths Business: Diversifying the Supply Chain for the „Vitamins of Modern Industry*. <https://www.sojitz.com/en/project/article/20260318.html> (05.08.2026).
- South Korean Ministry of Trade Industry and Energy (2023): *A strategy to secure key minerals for advancing into a global powerhouse in cutting-edge industries*.

https://www.kier.re.kr/resources/download/tpp/policy_230227_data.pdf (31.03.2026).

Streit, Stefanie; Passarella, Marinella; Tost, Michael (2025): „The influence of environmental policies on mineral permitting in Europe: Challenges and insights from Spain and Sweden“. *The Extractive Industries and Society* 24, 101727.

<https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101727>

UN Comtrade Database (2025a): *Trade Data - HS: 2846, Reporters: Japan, Partners: All, Periods: 2013, 2012, 2011, 2010, 2009, 2008, 2007, 2006, 2005, 2004, 2003, Trade Flows: Import.*

<https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=M&CommodityCodes=2846&Partners=all&Reporters=392&period=2012&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus>. (27.06.2025).

UN Comtrade Database (2025b): *Trade Data - HS: 2846, Reporters: Japan, Partners: All, Periods: Recent Periods, Trade Flows: Import.*

<https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=M&CommodityCodes=2846&Partners=all&Reporters=392&period=recent&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus>. (27.06.2025).

UN Comtrade Database (2025c): *Trade Data - HS: 280530, Reporters: Japan, Partners: All, Periods: 2013, 2012, 2011, 2010, 2009, 2008, 2007, 2006, 2005, 2004, 2003, Trade Flows: Import.*

<https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=M&CommodityCodes=280530&Partners=all&Reporters=392&period=2012&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus>. (27.06.2025).

UN Comtrade Database (2025d): *Trade Data - HS: 280530, Reporters: Japan, Partners: All, Periods: Recent Periods, Trade Flows: Import.*

<https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=M&CommodityCodes=280530&Partners=all&Reporters=392&period=recent&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus>. (27.06.2025).

USGS (2026): *Mineral commodity summaries 2026*. Reston, VA: 222

<https://doi.org/10.3133/mcs2026>.

USGS Mineral Resources Program (2025): *About the 2025 List of Critical Minerals*. <https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program/science/about-2025-list-critical-minerals#overview> (31.03.2026).

Van Gosen, Bradley S.; Verplanck, Philip L.; Seal II, Robert R.; Long, Keith R.; Gambogi, Joseph (2017): „Rare-earth elements, chap O“.

- Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply*, ed. by Klaus J. Schulz, Jr H. DeYoung, Robert R. Seal II, Dwaight C. Bradley. U.S. Geological Survey Professional Paper. 44.
- Yean, Tham S.; Rebecca, Neo H. Y. (2023): „Malaysia’s Return to Mining: Redeveloping Rare Earth Elements (REE)“. *ISEAS Perspective* 97, 14. https://www.iseas.edu.sg/wp-content/uploads/2024/01/ISEAS_Perspective_2023_97.pdf?
- Yildirim Ayyildiz, Melike; Ölmez, Jasemin A.; Hilgers, Christoph (2026): „Probability Assessment of Strategic and Total Rare Earth Element Supply for the EU Under the EU Critical Raw Materials Act“. *Resources* 15/6, 73. <https://doi.org/10.3390/resources15060073>
- Zadeh, John (2025): *Understanding the Time Delay Between Mining Discovery and Development*. <https://discoveryalert.com.au/widening-gap-discovery-development-mining-2025/> (27.07.2026).

Recycling von Seltenerd-Permanentmagneten des Nd-Fe-B-Typs: Herausforderungen und Lösungen

Carlo Burkhardt

Hochschule Pforzheim

Institut für strategische Technologie- und Edelmetalle

Abstract

Rare-earth permanent magnets of the Nd-Fe-B type are indispensable for Europe's green and digital transition, yet they are subject to pronounced supply risks due to the current dominance of Chinese production and growing global demand. This article reviews the findings of research which indicates that a combination of long-loop metallurgical routes and hydrogen-based short-loop magnet-to-magnet recycling can recover high-quality magnet material while substantially lowering environmental impacts compared with primary production. The analysis encompasses significant technical and systemic impediments, including the presence of mixed and dilute waste streams, challenges pertaining to access and dismantling, concerns regarding contamination, and limitations imposed by design constraints. Additionally, it addresses deficiencies in collection, labelling, and traceability, and puts forth prospective solutions such as automated disassembly, advanced powder purification, standardisation under the CRMA, and decentralised smart recycling nodes. The article under consideration draws upon recent pilot and early commercial deployments of HPMS in Europe to posit that the central challenge is now the creation of an integrated circular ecosystem. This ecosystem, the article contends, must couple technology, standards, digital information and market uptake in order to establish rare-earth magnet recycling as a core pillar of European strategic autonomy.

Zusammenfassung

Seltenerd-Permanentmagnete des Nd-Fe-B-Typs sind für den grünen und digitalen Wandel Europas unverzichtbar, unterliegen jedoch aufgrund der gegenwärtigen Dominanz der chinesischen Produktion und der weltweit wachsenden Nachfrage erheblichen Versorgungsrisiken. Dieser Beitrag gibt einen Überblick darüber, wie durch die Kombination metallurgischer Long-Loop-Routen und wasserstoffbasierter Short-Loop-Magnet-zu-Magnet-Recyclingverfahren hochwertiges Magnetmaterial zurückgewonnen werden kann, während die Umweltwirkungen gegenüber der Primärproduktion deutlich gesenkt werden. Analysiert werden zentrale technische und systemische Hemmnisse, darunter gemischte und verdünnte Abfallströme, schwieriger Zugang und Demontage, Kontaminationen und designbedingte Einschränkungen sowie Defizite bei Sammlung, Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit. Darüber hinaus werden aufkommende Lösungsansätze wie automatisierte Demontage, fortgeschrittene Pulverreinigung, Standardisierung im Rahmen des CRMA sowie dezentrale intelligente Recyclingknoten diskutiert. Aufbauend auf jüngsten Pilotanwendungen und frühen kommerziellen Implementierungen von HPMS in Europa wird argumentiert, dass die zentrale Herausforderung nun im Aufbau eines integrierten zirkulären Ökosystems liegt, das Technologie, Standards, digitale Informationen und Markteinführung miteinander verknüpft, um das Recycling von Seltenerd-magneten zu einem tragenden Pfeiler der europäischen strategischen Autonomie zu machen.

Keywords/Schlüsselwörter

Recycling von Nd-Fe-B-Permanentmagneten, Wasserstoffbasiertes Magnetrecycling (HPMS), Short- und Long-Loop-Recyclingrouten für Seltenerd-magnete, Kreislaufwirtschaft und kritische Rohstoffe, Pulveraufbereitung und Qualitätsoptimierung recycelter Magnete

1 Einleitung

Seltenerd-Permanentmagnete auf Basis von Neodym-Eisen-Bor-Legierungen sind Schlüsselmaterialien für den grünen und digitalen Wandel, da sie eine sehr hohe Energiedichte und Effizienz in kompakten Elektromotoren und Generatoren ermöglichen, wie sie in Elektrofahrzeugen, Windkraftanlagen, Robotik, Unterhaltungselektronik, Medizintechnik

und Luft- und Raumfahrtssystemen eingesetzt werden. Obwohl Seltenerdelemente für Magnete nur etwa ein Viertel des gesamten Produktionsvolumens von Seltenen Erden ausmachen, entfallen auf Magnetanwendungen ungefähr 80–90 % des Gesamtmarktwertes der Seltenen Erden, was die effiziente Rückgewinnung von magnetfähigem Material von strategischer Bedeutung macht (Howley 2025; Gauß u. a., o. J.; „Rare Earth Metals Market Analyses & Forecast: 2026-2033“, o. J.).

Europas derzeitige Position in dieser Wertschöpfungskette ist strukturell schwach, da China mehr als 90 % der weltweiten Nd-Fe-B-Magnetproduktion kontrolliert und die europäischen Industrien dadurch in hohem Maße importabhängig sowie anfällig für Versorgungsunterbrechungen und Preisvolatilität sind. Als Reaktion darauf priorisieren EU-Initiativen wie der Green Deal und der Critical Raw Materials Act (CRMA) zunehmend das Magnetrecycling und die zirkuläre Nutzung von Seltenen Erden als zentrale Elemente der Industrie- und Rohstoffpolitik und nicht mehr nur als Nischenthemen der Abfallwirtschaft. Das Recycling von RE-Fe-B-Magneten ist daher nicht nur eine Frage der Rückgewinnung kritischer Elemente, sondern auch ein Mittel zum Erhalt funktionaler Magnetleistung, zur Reduzierung externer Abhängigkeiten und zum Aufbau einer industriell tragfähigen Kreislaufwirtschaft für magnethaltige Produkte in Europa (Esly 2025; European Court of Auditors 2026).

2 Recyclingrouten für Nd-Fe-B-Magnete

Recyclingstrategien für Nd-Fe-B-Seltenerd-Permanentmagnete werden gemeinhin in drei Hauptkategorien unterteilt: Materialrecycling, Elementrecycling und direktes Magnetrecycling. Beim Materialrecycling oder Long-Loop-Recycling werden die Magnete zunächst wieder in seltenerdhaltige Verbindungen oder getrennte Seltenerdelemente überführt, typischerweise durch hydrometallurgische oder pyrometallurgische Prozesse, woraufhin die Wertschöpfungskette über Raffination, Legierungsherstellung und neue Magnetproduktion erneut beginnt. Diese Long-Loop-Routen sind technisch gut etabliert und können relativ kontaminierten Schrott verarbeiten, sie erfordern jedoch tendenziell große Mengen an Chemikalien, einen erheblichen Wasserverbrauch, mehrere Verfahrensschritte und einen insgesamt hohen Energieeinsatz (Kaya 2024; Ullah u. a. 2026; Alcaraz u. a. 2025).

Short-Loop-Recyclingansätze sind darauf ausgelegt, mehr von der ursprünglichen Legierungszusammensetzung und Mikrostruktur zu erhalten, anstatt vollständig zu elementaren oder oxidischen Formen zurückzukehren.

Innerhalb dieser Verfahrensfamilie wird häufig zwischen Routen unterschieden, die recyceltes Material in die Legierungsproduktion zurückführen, und Magnet-zu-Magnet-Routen, die Pulver direkt für neue Magnete bereitstellen; die wasserstoffgestützte Verarbeitung magnetischer Schrotte (HPMS) wird weithin als ein führendes Beispiel für Letzteres angesehen. Da HPMS die Prozesskette im Vergleich zum konventionellen Long-Loop-Recycling verkürzt, können geringere Umweltbelastungen erreicht werden, während gleichzeitig ein geeigneter Einsatzstoff für neue gesinterte, gebundene oder spritzgegossene Magnete bereitgestellt wird (Habibzadeh u. a. 2023; Yang u. a. 2017; Burkhardt u. a. 2023).

Beim wasserstoffbasierten direkten Recycling gesintertter NdFeB-Magnete dringt Wasserstoff in das Material ein, reagiert bevorzugt mit den neodymreichen Korngrenzphasen und bewirkt, dass der dichte Magnet zu einem entmagnetisierten Pulver aus hydrierten hartmagnetischen Körnern und sehr feinen Korngrenzpartikeln zerfällt, die mechanisch von Beschichtungen und metallischen Anbauteilen getrennt werden können. Das zurückgewonnene Pulver kann anschließend über mehrere nachgelagerte Prozesse weiterverarbeitet werden, darunter konventionelles Sintern, Wasserstoffierungs-Disproportionierungs-Desorptions-Rekombinations-Verfahren (HDDR) für gebundene Magnete sowie Metallspritzgussprozesse für komplex geformte Bauteile (Burkhardt et al. 2023).

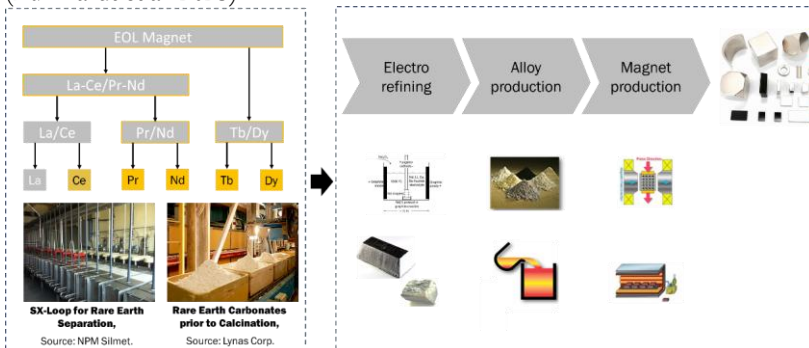


Abb. 1: Long-Loop-Recycling „Magnet zu Oxid“ (z. B. CareMag, Frankreich)

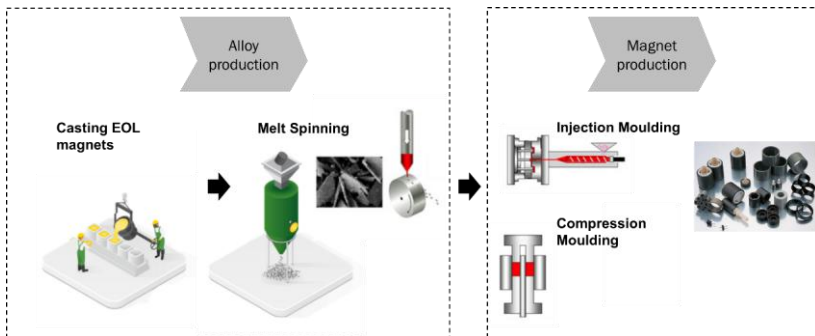


Abb. 2: Short-Loop-Recycling „Magnet zu Legierung“ (z. B. Remloy, Deutschland)

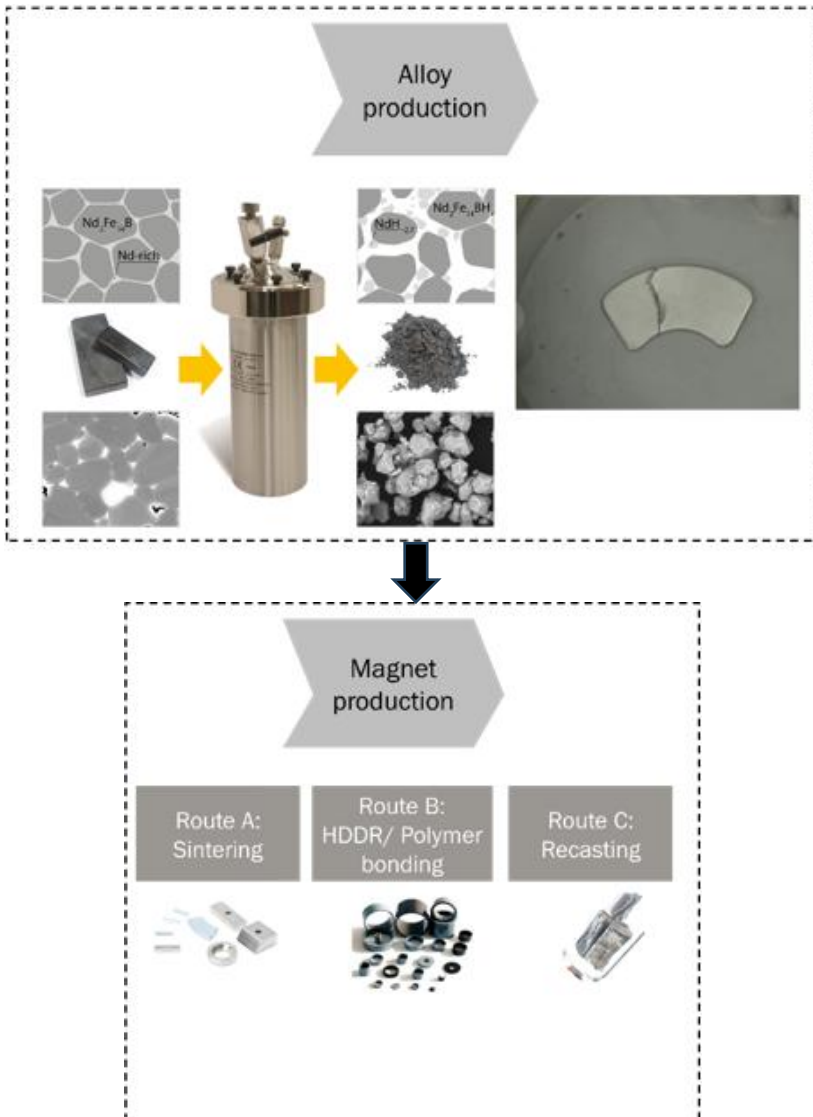


Abb. 3: Short-Loop-Recycling „Magnet zu Magnet“ (z. B. HyProMag UK/Deutschland)

3 Zentrale Herausforderungen

Der geringe Magnetanteil in vielen Endanwendungen stellt eine zweite große Herausforderung dar. In typischen Konsumgütern wie Festplattenlaufwerken machen NdFeB-Magnete nur etwa 1–2 % des Gesamtgewichts des Produkts aus, sodass die Arbeits- und Ausrüstungskosten der Demontage den Wert des zurückgewonnenen Magnetmaterials leicht übersteigen können. Zudem sind Magnete häufig tief im Produkt eingebettet oder mit robusten Gehäusen und Klebstoffen fixiert, und konventionelle schredderbasierte Behandlungsverfahren führen dazu, dass sich Seltenerdelemente in gemischten Eisenfraktionen verteilen oder verdünnen, wodurch die meisten Möglichkeiten einer hochwertigen NdFeB-Rückgewinnung effektiv zerstört werden. Aus diesen Gründen gelten automatisierte Extraktionstechnologien, produktspezifische Demontagekonzepte und eine verbesserte Identifizierung magnethaltiger Komponenten zunehmend als zentrale Elemente tragfähiger Recyclingsysteme und nicht als bloße Zusatzoptionen (Huang 2025).

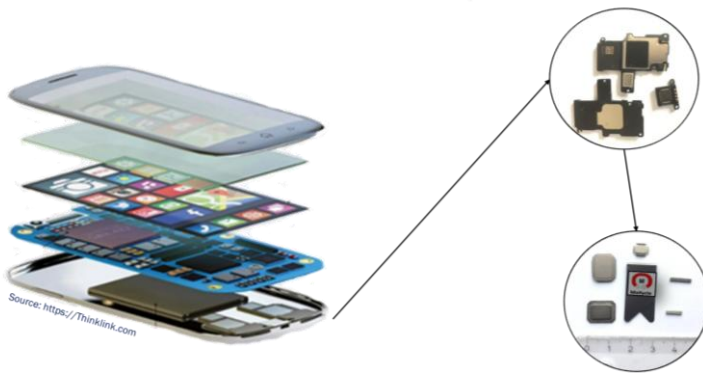


Abb. 4: Ein modernes Smartphone enthält nur wenige Gramm Magnetmaterial



Abb. 5: Stark mit Klebstoff kontaminierte Magnete aus Windkraftanlagen (im Stahlgehäuse)

Schließlich bestehen entlang der gesamten zirkulären Kette weiterhin erhebliche systemische Barrieren. Analysen des Recyclings kritischer Rohstoffe in der EU heben unterentwickelte Sammel- und Rücknahmesysteme, einen Mangel an standardisierter Kennzeichnung, eine begrenzte Rückverfolgbarkeit magnethaltiger Produkte, unzureichende Design-for-Recycling-Leitlinien sowie unsichere wirtschaftliche Rahmenbedingungen für den Ausbau dedizierter Recyclinginfrastrukturen hervor. Jüngste europäische Initiativen plädieren daher für integrierte Ansätze, die Sammlung, Logistik, Sortierung, Vorbehandlung, Raffination, Fertigung, Kompetenzentwicklung, politische Rahmenbedingungen und Marktintegration als Bestandteile eines einzigen koordinierten Systems betrachten und nicht als isolierte technische Aufgaben (Rizos u. a. 2024).

4 Aufkommende Lösungen

Eine erste Gruppe von Lösungen konzentriert sich auf die Verbesserung des Zugangs zu magnethaltigen Abfallströmen. Pilotprojekte im Rahmen europäischer Initiativen wie SUSMAGPRO und verwandter Programme haben automatisierte und halbautomatisierte Demontagesysteme für Festplattenlaufwerke, Flachbildfernseher, Pumpen und Lautsprecherbaugruppen demonstriert und dadurch praktische Erfahrungen bei der Gewinnung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Produkten er-

zeugt. Diese Aktivitäten liefern entscheidende Datensätze zu Produktarchitekturen und Demontageverhalten, die wiederum die Entwicklung von Komponenten-Erkennungsalgorithmen, automatisierten Demontagekonzepten und anwendungsspezifischen Recyclingstrategien untermauern („Sustainable recovery, recycling and reuse of rare-earth magnets in a circular economy (SUSMAGPRO)“, o. J.).

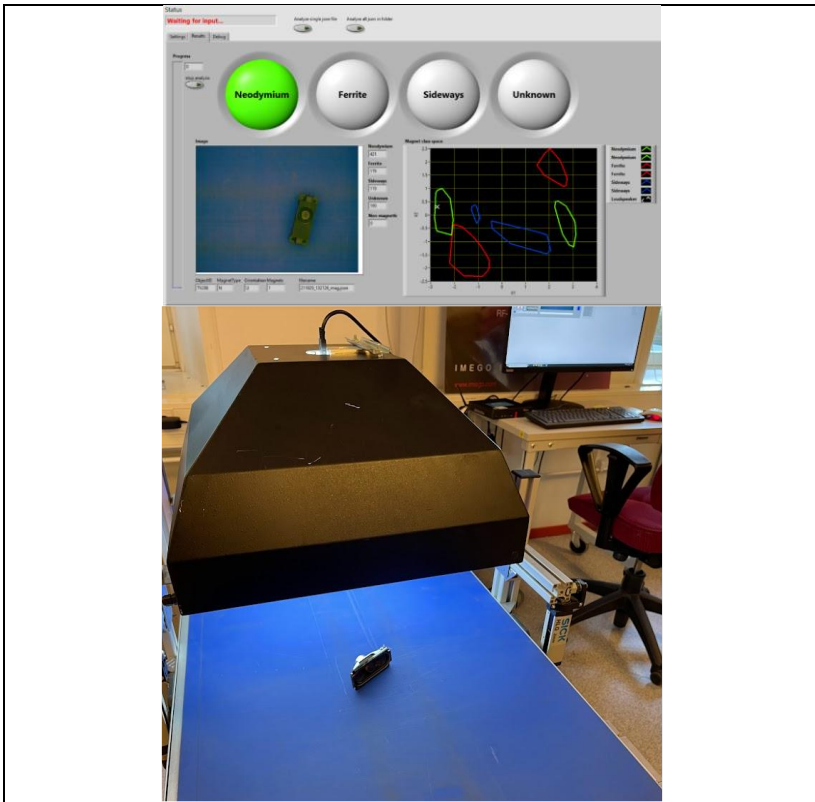


Abb. 6: Automatisches Detektionssystem für NdFeB-Magnete in Altgeräten von Flachbildfernsehern

Eine zweite Gruppe von Lösungen zielt auf eine verbesserte Pulverqualität aus recycelten Magneten ab. Über die grundlegenden Schritte der Wasserstoffdekrepitation und des HPMS hinaus kombiniert die jüngere Forschung Strahlmahlung, zyklonbasierte Klassierung sowie selektive

Laugung oder analoge Behandlungen, um oxidreiche Korngrenzphasen zu entfernen, den Sauerstoffgehalt zu senken und das zurückgewonnene Material zu magnetfähigem Einsatzstoff aufzubereiten, der sich für eine leistungsfähige Wiederverarbeitung eignet. Zu den Trends der Prozessoptimierung zählen eine feinere Kontrolle der Partikelgrößenverteilung, die In-situ-Abtrennung von Oxid- und Beschichtungsrückständen sowie die systematische Korrelation von Partikelgrößenfraktionen mit den resultierenden magnetischen Eigenschaften, um Mikrostruktur und Leistungsfähigkeit recycelter Magnete gezielt einstellen zu können.

Eine dritte Maßnahmenfamilie adressiert das zirkuläre Produkt- und Wertschöpfungskettendesign. Die sich entwickelnde Standardisierungslandschaft rund um Seltenerdminerale umfasst technische Spezifikationen unter CEN/TC 472 sowie verwandte ISO-Arbeitspunkte, die Anforderungen an die Deklaration recyclingrelevanter Informationen definieren, darunter Magnettyp, Zusammensetzung, Beschichtungen, Fixierungsmethoden und die Bereitstellung von Datenträgern für Produktinformationen. Im Einklang mit dem Critical Raw Materials Act sollen solche Standards die Magnetidentifikation unterstützen, ein besseres Design for Recycling ermöglichen und sicherstellen, dass Anforderungen an Rückverfolgbarkeit und Transparenz erfüllt werden können, wenn recycelte Magnete in industrielle Lieferketten eintreten („CRMA: Commission Proposes New Circularity Rules for Magnets in EEE“ 2026; Institute for European Environmental Policy 2023).

Ein vierter Lösungspfad umfasst die dezentrale Systemintegration. Jüngere Modellierungen und Projektkonzepte schlagen „intelligente“ regionale Recyclingknoten vor, in denen Lokalisierung, Sortierung, automatisierte Demontage und Vorverarbeitungsschritte nahe an den Abfallquellen zusammengeführt werden. Dadurch können Transportdistanzen, logistikbedingte Emissionen und Handhabungskosten reduziert sowie Rückgewinnungsraten aus heterogenen urbanen Minen verbessert werden. Szenarioanalysen für solche dezentralen Netzwerke deuten darauf hin, dass sie gegenüber rein zentralisierten Ansätzen bei geeigneter Standortwahl und Integration in umfassendere zirkuläre Lieferketten signifikant höhere Rückgewinnungsraten für NdFeB-Magnete und bemerkenswerte Reduktionen transportbedingter Umweltwirkungen erzielen können (Cheramin u. a. 2021).

5 Stand der Technik und Skalierung

Die Umweltleistung ist ein wesentlicher Treiber für die weitere Verbreitung des HPMS-basierten Recyclings. Ex-ante-Lebenszyklusanalysen, die recycelte und primäre NdFeB-Wertschöpfungsketten vergleichen,

zeigen im Allgemeinen deutlich geringere Klimawirkungen und andere Umweltbelastungen für Short-Loop-Recyclingrouten als für konventionellen Bergbau und primäre Magnetproduktion, insbesondere wenn HPMS chemikalienintensive Prozessschritte ersetzt. Jüngere Studien zum Product Carbon Footprint von HPMS-Routen berichten sehr geringe spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Kilogramm recycelter NdFeB-Magnete im Vergleich zu typischen Primär-Benchmarks und betonen zugleich, dass die absolute Wirkung stark von Parametern wie Strommix, Hilfsstoffen und Anlagendesign abhängt, was den Bedarf an fortlaufender Prozessoptimierung unterstreicht.



Abb. 7: HPMS-Reaktor im kommerziellen Maßstab bei HyProMag GmbH, Deutschland

Die Skalierung des Magnetrecyclings lässt sich jedoch nicht darauf reduzieren, lediglich die Reaktorgröße oder den Durchsatz zu erhöhen. Systemanalysen zirkulärer Lieferketten für Seltenerd-magnete argumentieren, dass die langfristige Wettbewerbsfähigkeit davon abhängen wird, Abfallvorbehandlung, Legierungsrückgewinnung, Magnetfertigung, Design for

Circularity, Lebenszyklus- und technoökonomische Bewertung, Rückverfolgbarkeit, Kompetenzentwicklung und Markteinführung in einen kohärenten europäischen Rahmen zu integrieren. Diese integrierte Perspektive ist insbesondere für komplexe Abfallströme wie Traktionsmotoren, Windkraftgeneratoren, Industrieanlagen und gemischte Elektro- und Elektronik-Altgeräte von entscheidender Bedeutung, da Heterogenität der Einsatzstoffe, eingebettete Magnetdesigns und anspruchsvolle Demontagebedingungen koordinierte Lösungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette und nicht nur isolierte Prozessverbesserungen erfordern.

6 Diskussion

Jüngste technische und kommerzielle Entwicklungen zeigen, dass die grundlegende Machbarkeit des Recyclings von RE-Fe-B-Magneten, insbesondere über wasserstoffbasierte Short-Loop-Routen wie HPMS, inzwischen gut belegt ist; Pilot- und frühe Industrieanlagen produzieren bereits recycelte Magnete in kommerzieller Qualität aus unterschiedlichen Schrottströmen. Das direkte HPMS-Recycling gewinnt nachweislich nutzbares NdFeB-Pulver zurück und ermöglicht die Herstellung leistungsfähiger recycelter Magnete über mehrere nachgelagerte Routen, wodurch sich die zentrale Herausforderung von der Machbarkeit des Kernprozesses hin zum Aufbau eines robusten industriellen Ökosystems verschiebt, das ausreichende, gut charakterisierte Einsatzstoffe in stabiler Qualität und zu tragfähigen Kosten für passend konfigurierte Recyclinglinien bereitstellen kann („Rare Earth Magnet Recovery for Environmental and Resource Protection“ 2017; Gillebert 2026).

Diese Perspektive verlagert die Aufmerksamkeit von einzelnen Verfahrensschritten auf die Leistungsfähigkeit der gesamten zirkulären Kette. Analysen der Lieferketten für Seltenerdmodule zeigen, dass Produktidentifikation, Zugang für die Demontage, Kontaminationskontrolle, Pulveraufbereitung, Ökodesign, Rückverfolgbarkeit und Markteinführung eng miteinander verknüpft sind und dass Schwächen in jedem dieser Glieder ansonsten leistungsfähige Pulververarbeitungstechnologien wie HPMS untergraben können. Infolgedessen argumentieren mehrere jüngere Studien und Branchen-Roadmaps, dass der resilienteste Ansatz in einem Hybridmodell besteht, das saubere, gut sortierte Ströme mittels Short-Loop-Magnet-zu-Magnet-Recycling verarbeitet und stärker kontaminierte oder hinsichtlich der Zusammensetzung gemischte Materialien durch komplementäre

hydrometallurgische oder pyrometallurgische Long-Loop-Prozesse behandelt (Porsche Consulting, o. J.; Hsu u. a. 2024).

Für Europa hat dies klare strategische Implikationen. Der Aufbau einer zirkulären Wirtschaft für Seltenerd-magnete erfordert nicht nur effiziente Recyclinganlagen, sondern auch harmonisierte Standards, digitale Produktinformationssysteme, verlässliche industrielle Abnahme, unterstützende politische Rahmenbedingungen, gezielte Aus- und Weiterbildung sowie eine enge Zusammenarbeit zwischen Recyclern, Magnetherstellern, Erstausrüstern (*Original Equipment Manufacturer*) und der Forschungsgemeinschaft. Europäische Politik- und Projektberichte rahmen das Magnetrecycling zunehmend als industrielle Plattform und strategische Infrastruktur für kritische Rohstoffe und nicht als eng umrissene Abfallmanagementaktivität und verankern es damit in breiteren Initiativen zu Zirkularität, Resilienz und offener strategischer Autonomie (Smerigan und Shi 2026).

7 Schlussfolgerung

Das Recycling von RE-Fe-B-Permanentmagneten hat sich von einer rein technischen Herausforderung zu einem strategischen Hebel für den grünen und digitalen Wandel Europas entwickelt. Leistungsfähige Short-Loop-Routen wie HPMS, ergänzt durch metallurgische Long-Loop-Optionen, bieten heute technisch ausgereifte Wege zur Rückgewinnung magnetfähigen Materials bei deutlich geringeren Umweltbelastungen als in der Primärproduktion, sofern Kontaminationen und produktdesignbedingte Einschränkungen angemessen beherrscht werden. Die entscheidende Aufgabe der kommenden Jahre besteht darin, ein integriertes zirkuläres Ökosystem aufzubauen, das fortgeschrittene Demontage- und Pulveraufbereitungstechnologien mit Design-for-Recycling-Standards, digitalen Produktinformationen, dezentralen intelligenten Recyclingknoten und unterstützender Politik verknüpft und so sicherstellt, dass ausreichende Mengen hochwertiger Einsatzstoffe in effiziente Recyclinglinien gelangen und recycelte Magnete zuverlässig von der Industrie aufgenommen werden. Gelingt diese systemische Integration, kann das Recycling von Seltenerd-magneten zu einem Eckpfeiler europäischer strategischer Autonomie werden, indem es kritische Rohstoffe sichert, Versorgungsrisiken reduziert, Umweltwirkungen senkt und Zirkularität entlang zentraler Wertschöpfungsketten von der E-Mobilität bis zur erneuerbaren Energie verankert.

Bibliographie

- Alcaraz, Lorena; Rodríguez-Largo, Olga; Barquero-Carmona, Gorka; Berja, Alba; Quesada, Adrián; López, Félix A. (2025): „Recovery of Rare Earths from End-of-Life NdFeB Permanent Magnets from Wind Turbines“. *ChemSusChem* 18/10, e202402237. <https://doi.org/10.1002/cssc.202402237>.
- Burkhardt, Carlo; Van Nielen, S.; Awais, M. u. a. (2023): „An Overview of Hydrogen Assisted (Direct) Recycling of Rare Earth Permanent Magnets“. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 588 (Dezember), 171475. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171475>.
- Cheramin, Meysam; Saha, Apurba Kumar; Cheng, Jianqiang; Paul, Sanjoy Kumar; Jin, Hongyue (2021): *Resilient NdFeB magnet recycling under the impacts of COVID-19 pandemic: Stochastic programming and Benders decomposition*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1981781>.
- CRMA: Commission Proposes New Circularity Rules for Magnets in EEE“. 2026. März 2. <https://erp-recycling.org/ic/news-and-events/2026/03/crma-commission-proposes-new-circularity-rules-for-magnets-in-eee/>.
- Esly, Erik (2025): „Change of perspective: Europe’s lesson from China’s rare earth success“. September 29. <https://www.erikesly.com/en/post/perspektivwechsel-europas-lektion-aus-chinas-seltene-erden-erfolg>.
- European Court of Auditors (2026): „Critical raw materials for the energy transition – Not a rock-solid policy“. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi:10.2865/5008580>.
- Gauß, Roland; Burkhardt, Carlo; Carencotte, Frédéric u. a. o. J. „Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance. Berlin 2021. Zugegriffen 6. April 2026. https://eitrawmaterials.eu/sites/default/files/2024-11/2021_07-13_REE%20Cluster%20Report.pdf.
- Gillebert, Florine (2026): *The Business Case for Recycling Critical Materials*. Januar 19. <https://blog.3ds.com/topics/sustainability/recycling-critical-materials-business-case/>.
- Habibzadeh, Alireza; Kucuker, Mehmet Ali; Gökelman, Mertol (2023): „Review on the Parameters of Recycling NdFeB Magnets via a Hydrogenation Process“. *ACS Omega* 8/20, 17431-17445.

- <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00299>.
- Howley, Jack (2025): „Electrification and Robotics to Drive Future Rare Earth Magnet Demand“. Dezember 2.
<https://www.idtechex.com/en/research-article/electrification-and-robotics-to-drive-future-rare-earth-magnet-demand/34117>.
- Hsu, Wan-Ting; Petavratzi, Evi; Zils, Markus u. a. (2024): „Mapping the Flows and Stocks of Permanent Magnets Rare Earth Elements for Powering a Circular Economy in the UK“. *Sustainable Production and Consumption* 47 (Juni), 37-46.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.027>.
- Huang, Ethan (2025): *Advanced Rare Earth Magnet Recycling*. Juni 6.
<https://www.topmag.in/rare-earth-magnet-recycling/>.
- Institute for European Environmental Policy (2023): „Circularity and the European Critical Raw Materials Act“. <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/10/Circularity-and-the-European-Critical-Raw-Materials-Act-IEEP-2023.pdf>.
- Kaya, Muammer (2024): „An Overview of NdFeB Magnets Recycling Technologies“. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 46 (April), 100884. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100884>.
- Porsche Consulting. o. J. „Closing the Loop on Rare Earth Magnets“. Zugegriffen 6. April 2026.
https://www.porsche-consulting.com/sites/default/files/2025-10/Business_Case_Rare_Earth_Magnets_Recycling_2025.pdf.
- Rare Earth Magnet Recovery for Environmental and Resource Protection (2017) Mai 11.
<https://cordis.europa.eu/project/id/310240/reporting>.
- Rare Earth Metals Market Analyses & Forecast: 2026-2033. o. J. Zugegriffen 6. April 2026.
<https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/rare-earth-metals-market-293>.
- Rizos, Vasileios; Righetti, Edoardo; Kassab, Amin (2024): „Understanding the Barriers to Recycling Critical Raw Materials for the Energy Transition: The Case of Rare Earth Permanent Magnets“. *Energy Reports* 12 (Dezember): 1673-1682.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.022>.
- Smerigan, Adam; Shi, Rui (2026): „Toward Sustainable Rare Earth Element Production: Key Challenges in Techno-Economic, Life Cycle,

and Social Impact Assessment“. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 14/6, 2733-2751.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c06147>.

Sustainable recovery, recycling and reuse of rare-earth magnets in a circular economy (SUSMAGPRO). o. J. Zugriffen 6. April 2026.
<https://www.steinbeis-europa.de/en/projects/sustainable-recovery-recycling-and-reuse-of-rare-earth-magnets-in-a-circular-economy>.

Ullah, Rehan; Daza, Jason; Wederni, Asma; Escoda, Lluisa; Saurina, Joan; Suñol, Joan-Josep (2026): „A Review on Sustainable Recycling of NdFeB Waste: Methodologies, Challenges, and the Integration of Machine Learning (ML)“. *Materials* 19/3, 594.

<https://doi.org/10.3390/ma19030594>.

Yang, Yongxiang; Walton, Allan; Sheridan, Richard u. a. (2017): „REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review“. *Journal of Sustainable Metallurgy* 3/1, 122-149.

<https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>.

Vom Quarz zum Solarmodul: Momentane Herausforderungen und Zukunftsperspektiven der europäischen Silizium-Wertschöpfungskette

Axel Müller
(*MLS, Oslo*)

Abstract

The value chain to produce silicon wafers for photovoltaic modules extends from the exploration of suitable quartz deposits and their extraction, through the production of metallurgical-grade silicon, polysilicon, and monocrystalline silicon, to the sawing of wafers and the subsequent manufacture of solar cells and modules. While Europe still had a complete value chain for solar module production around 15 years ago and was able to cover its own demand, the industrial base has since eroded significantly. With the closure of RW Silicium GmbH, there is no longer any metallurgical-grade silicon production in Germany; at the same time, European production is declining, even though Europe still accounts for around 5 % of global metallurgical-grade silicon output. This stands in contrast to political objectives such as the EU Solar Energy Strategy and the Critical Raw Materials Act, which aim for 10 % domestic production of critical raw materials by 2030. In Europe, Wacker Chemie AG is now effectively the only significant player in the upstream segment; its metallurgical-grade silicon produced in Norway is primarily used for its own polysilicon production. The resulting polysilicon is used predominantly for wafer manufacturing outside Europe, as there is currently no industrial-scale production of ingots and wafers within Europe. For solar cell and solar module production, only a small share of the wafers manufactured predominantly in China is imported into Europe, where only a few manufacturers are active. By

contrast, China controls all stages of the photovoltaic value chain in 2025 and dominates the global market, flanked by additional players in Southeast Asia. Europe is losing further importance, both technologically and in terms of trade strategy. A future option lies in building an efficient recycling infrastructure for solar modules. In view of rapidly growing volumes of end-of-life modules, the recovery and use of recycled polysilicon in particular offers an opportunity to close strategic gaps in the value chain and strengthen supply security.

Resümee

Die Wertschöpfungskette für die Herstellung von Siliziumwafern für Photovoltaikmodule reicht von der Erkundung geeigneter Quarzlagertstätten und deren Abbau über die Produktion von Rohsilizium, Polysilizium und Siliziumeinkristallen bis hin zum Sägen der Wafer sowie der anschließenden Fertigung von Solarzellen und -modulen. Während Europa vor rund 15 Jahren noch eine vollständige Wertschöpfungskette der Solarmodulproduktion besaß und den Eigenbedarf decken konnte, ist die industrielle Basis seither stark erodiert. Mit der Schließung der RW Silicium GmbH gibt es in Deutschland keine Rohsiliziumproduktion mehr. Zugleich geht die europäische Produktion insgesamt zurück, und die EU hält nur noch einen Anteil von etwa 5 % an der weltweiten Rohsiliziumproduktion. Dies steht im Widerspruch zu politischen Zielen wie der EU Solar Energy Strategy und dem Critical Raw Materials Act, die eine Eigenproduktion von 10 % kritischer Rohstoffe bis 2030 anstreben. In Europa fungiert an der Basis der Wertschöpfungskette nur noch die Wacker Chemie AG als bedeutender Akteur, deren in Norwegen erzeugtes Rohsilizium vorrangig der eigenen Polysiliziumproduktion dient. Das daraus gewonnene Polysilizium wird überwiegend für die Waferherstellung außer-europäisch genutzt, da es in Europa derzeit keine industrielle Produktion von Siliziumblöcken und -wafern mehr gibt. Für die Solarzellen- und Solarmodulproduktion wird nur ein kleiner Teil der überwiegend in China gefertigten Wafer von Europa importiert, wo lediglich einige Hersteller tätig sind. Demgegenüber kontrollierte China 2025 sämtliche Stufen der Photovoltaik-Wertschöpfungskette und dominiert den Weltmarkt, flankiert von weiteren Akteuren in Südostasien. Europa wird dadurch, sowohl technologisch als auch handelsstrategisch weiter an Bedeutung zu verlieren. Eine Zukunftsoption liegt im Aufbau einer leistungsfähigen Recyclinginfrastruktur für Solarmodule. Angesichts stark wachsender Mengen ausgedienter Module eröffnet

insbesondere die Rückgewinnung und Nutzung von recyceltem Polysilizium die Chance, strategische Lücken in der Wertschöpfungskette wieder zu schließen und die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

Keywords/Schlüsselwörter

Silicon, quartz, photovoltaics, solar modules, raw materials, supply chains, value chains, Critical Raw Materials Act;

Silizium, Quarz, Photovoltaik, Solarmodule, Rohstoffe, Lieferketten, Wertschöpfungsketten, Critical Raw Materials Act.

1 Einleitung

Am 31. Dezember 2025 wurde die letzte Schmelzhütte für Rohsilizium in Deutschland geschlossen und alle 110 Beschäftigten wurden entlassen (Astheimer 2025). Die Hütte in Pocking südlich von Passau, die von der RW Silicium GmbH - einer Tochtergesellschaft der niederländischen AMG Advanced Metallurgical Group N.V. - betrieben wurde, produzierte Rohsilizium für die chemische Industrie, die Solar- und die Halbleiterbranche und hielt im Jahr 2022 noch einen Weltmarktanteil an der Rohsiliziumproduktion von 1,7 % (circa 62.000 Tonnen; USGS 2026). Damit ist die Basis der Wertschöpfungskette für die Siliziummodul-Produktion für die Solarenergienutzung in Deutschland entfallen, und der gesamte Bedarf der deutschen Polysiliziumhersteller – dem nächsten Schritt in der Wertschöpfungskette der Solarmodulherstellung (Abbildung 1) – muss nun durch Importe gedeckt werden. Als Gründe für die Schließung werden die hohen Strompreise in Deutschland, eine rückläufige Nachfrage sowie ein starker Preisdruck durch kostengünstiges Rohsilizium, insbesondere aus China, genannt.

Die Schließung der Siliziumhütte in Pocking steht zum einen im deutlichen Kontrast zum weltweit in den vergangenen drei Jahren stark gestiegenen Ausbau der Solarenergiekapazitäten und zum anderen zur EU-Politik im Rahmen des Critical Raw Materials Act (Silizium ist von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft), die darauf abzielt, die Abhängigkeit von Rohsiliziumimporten aus dem außereuropäischen Markt zu verringern.

In Deutschland wurden nach vorläufigen Daten im Jahr 2025 etwa 16,4 bis 16,6 Gigawatt neue Photovoltaikleistung installiert (Bundesnetzagentur 2026). Damit liegt Deutschland weltweit an vierter Stelle beim Ausbau der Kapazitäten zur Solarstromerzeugung. Ende 2025 betrug die kumulierte installierte Gesamtleistung der Solarenergie in Deutschland

rund 117 Gigawatt. Der Anteil der Solarstromerzeugung an der gesamten inländischen Energieproduktion lag im selben Jahr bei 16 % (Statistisches Bundesamt 2026).



Abb. 1: Wertschöpfungskette des Siliziums in der Solarmodulproduktion. Nach der Polysiliziumproduktion verzweigt sich die Kette in die Herstellung polykristalliner Solarzellen (14 % der Produktion im Jahr 2025) und monokristalliner Solarzellen (86 % der Produktion im Jahr 2025). Die prozentualen Anteile an den einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette für 2024 stammen aus der International Energy Agency (2025). Die Zahlen zur Solarstromerzeugung 2025 (in TWh = Terawattstunde) für Europa und Deutschland wurden von Ember Energy (2026) übernommen, die weltweiten Daten von der International Renewable Energy Agency (2026).

Der Ausbau der Solarenergiekapazitäten (s. Abbildung 2) hat eine enorme Nachfrage nach Solarmodulen zur Folge. Bis Ende 2024 waren weltweit etwa 2.200 Gigawatt an Solarenergieleistung installiert. Die Grafik zeigt, dass die Solarmodulinstallationen seit etwa 2021 exponentiell angestiegen sind. Dies führt zu einer erheblich wachsenden Nachfrage nach Solarmodulen und damit nach den dafür benötigten Rohstoffen, allen voran Silizium. Nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur liegt der Anteil der weltweiten Stromerzeugung aus Solaranlagen inzwischen bei über 10 %. Der Hauptakteur der Solarmodulproduktion ist China, dessen Unternehmen zusammen bis 86 % der

weltweiten Produktionskapazitäten verfügen (Solartech 2025). Mit einem jeweiligen Anteil von 3 bis 2 % folgen Indien, USA, Vietnam, Thailand und Malaysia. In Deutschland werden auch Solarmodule produziert aber mit einem globalen Marktanteil von weniger als 0,2 %. Chinas Dominanz in der Solarmodulherstellung geht jedoch über die einfache Montage von Solarzellen hinaus. Das Land hat eine vertikal integrierte Lieferkette aufgebaut, die jeden Produktionsschritt der Wertschöpfungskette kontrolliert, von der Rohmaterialgewinnung und -verarbeitung bis hin zu den fertigen Modulen. Im Jahr 2025 beherrschte China alle Stufen der Photovoltaik-Wertschöpfungskette, einschließlich der Produktionskapazitäten für Polysilizium, Wafer, Solarzellen und -module (Wood Mackenzie 2026; Abbildung 1). Ein Einbruch im Handel mit China würde den Ausbau der Photovoltaik und die Instandhaltung in Deutschland ernsthaft gefährden und zudem die heimische Modulfertigung aufgrund fehlender Vorprodukte massiv beeinträchtigen.

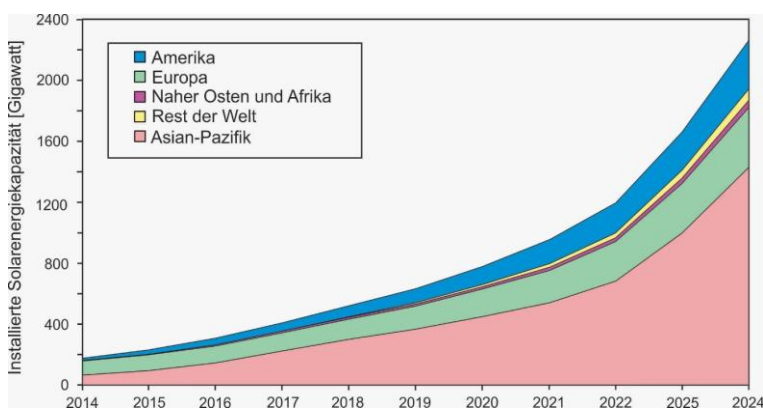


Abb. 2: Weltweit installierte Solarenergiekapazität (in Gigawatt) (Quelle: International Energy Agency 2026)

Dass Deutschland vom außereuropäischen Markt für Photovoltaik vom Ausland abhängig ist, liegt weder an fehlenden Rohstoffen noch an mangelndem Know-how für die Fertigung. Der Produktionsprozess erfordert umfangreiches Fachwissen – weit über die reine Siliziumproduktion hinaus. Inzwischen bewerten viele Länder dieses Wissen als strategisch wichtig für ihre eigene Sicherung der Energieversorgung. Hinzu kommt, dass sich die Technologie und der Markt für Solarmodule in ständigem Wandel befinden, was von an der Wertschöpfungskette beteiligten Produzenten ein hohes Maß an Flexibilität erfordert. Die

technologischen Veränderungen werden vor allem durch die Steigerung des Wirkungsgrades von Solarzellen und die Reduktion des Materialverbrauchs vorangetrieben. Dies hat zur Folge, dass die Qualitätsanforderungen an die Rohstoffe steigen und sowohl der Produktionsaufwand als auch der Energieverbrauch für die Herstellung zunehmen. Noch im Jahr 2018 bestanden beispielsweise rund 96 % der ausgelieferten Solarmodule aus polykristallinem Silizium. Im Jahr 2025 dominieren Module aus monokristallinen Siliziumwafern den Markt mit einem geschätzten Anteil von über 86 % (International Technology Roadmap for Photovoltaics 2025). Monokristalline Solarmodule bestehen aus einem einzigen, durchgehenden Siliziumkristall, der einen nahezu ungehinderten Elektronenfluss ermöglicht und damit Wirkungsgrade von etwa 20 bis 25 % erlaubt. Polykristalline Module erreichen hingegen geringere Wirkungsgrade von etwa 15 bis 17 %.

In Deutschland sind nur einige Glieder der Wertschöpfungskette der Solarmodulproduktion vorhanden (s. Abbildung 1). Während es im Jahr 2010 in Deutschland und Europa noch eine vollständige photovoltaische Wertschöpfungskette gab, wurde die Produktion einiger Vor- und Zwischenprodukte in der Zwischenzeit eingestellt, unter anderem aufgrund der zwischenzeitlich gesunkenen regionalen Nachfrage, steigender Energiepreise sowie der Niedrigpreisproduktion durch Wettbewerber. Nennenswerte Anteile am Weltmarkt an Zwischenprodukten der Wertschöpfungskette halten heute noch der Polysiliziumproduzent Wacker Chemie AG und einige Solarmodulhersteller. In Europa existieren kleinere Modulfertigungen, jedoch kaum Solarwafer- oder Zellproduktion.

In diesem Beitrag wird zunächst ein Überblick über die Wertschöpfungskette der Solarmodulherstellung mit Blick auf den Hauptrohstoff und wesentlichen Bestandteil Silizium gegeben. Im zweiten Teil werden die noch vorhandenen Produktionsstufen und Akteure sowie ihr Anteil an der Wertschöpfungskette in Deutschland und der EU näher beleuchtet, mit einem besonderen Fokus auf die Rohsilizium- und Polysiliziumproduktion. Abschließend werden die Konsequenzen diskutiert, die sich daraus ergeben, dass in Deutschland und der EU nur eine unvollständige Wertschöpfungskette für die Solarmodulproduktion vorhanden ist.

2 Die Wertschöpfungskette von Silizium-Solarmodulen

Die Photovoltaik-Wertschöpfungskette der Silizium-Wafertechnologie beginnt mit der Erkundung des natürlich vorkommenden Minerals Quarz (SiO_2 ; s. Abbildung 1), das Ausgangsrohstoff für die Herstellung

von Siliziumwafern ist, dem zentralen Bauteil von Solarmodulen mit einem Produkt-Massenanteil von 74% (Wirth 2026). Quarz ist eines der häufigsten Minerale der Erdkruste und das siliziumreichste unter ihnen. Aus diesen Gründen wird Quarz als primärer Siliziumrohstoff genutzt. Elementares Silizium kommt auf der Erde nicht vor, da es eine hohe Affinität zu Sauerstoff besitzt und unter oxidierenden Bedingungen mit diesem reagiert. Dabei entstehen stabile Verbindungen, vor allem Quarz und verschiedene Silikate.

Die Quarzrohstoffe müssen spezifische Anforderungen für die Siliziumherstellung erfüllen. Quarz ist aufgrund seiner großen Verbreitung ein vergleichsweise kostengünstiger Rohstoff. Prinzipiell sind drei Qualitätskriterien für den Rohstoff erforderlich. Erstens werden für das Schmelzverfahren zur Rohsiliziumproduktion im Lichtbogenofen Quarzkörnungen zwischen 10 und 150 mm benötigt (Aasly 2008). Diese Stückgrößen, die durch die Gewinnung von Quarzschottern und -kiesen erreicht werden, sind entscheidend für einen gleichmäßigen Gasstrom im Lichtbogenofen, um effiziente Reaktionsraten zu gewährleisten. Quarzsande sind aufgrund ihrer geringen Korngröße so dicht gepackt, dass die Luft nicht ausreichend zirkulieren kann, und somit nicht geeignet. Zweitens müssen die Quarzschotter und -kiese eine hohe thermische Stabilität aufweisen, damit sie beim Erhitzen nicht in kleinere Fragmente zerfallen, da dies den Reduktionsprozess beeinträchtigen würde (Aasly 2008). Drittens müssen die Schotter und Kiese für die Siliziummetallproduktion bestimmte chemische Qualitätsanforderungen erfüllen. Die Stückquarkonzentrate müssen einen SiO_2 -Gehalt von $> 99,4$ Gew.% aufweisen, wobei die Gehalte der Begleitelemente folgende Höchstkonzentrationen nicht überschreiten dürfen: 0,15 Gew.% Al_2O_3 , 0,1 Gew.% Fe_2O_3 , 0,05 Gew.% TiO_2 , 0,2 Gew.% MgO , 0,1 Gew.% CaO , 0,1 Gew.% K_2O und 0,005 Gew.% P_2O_5 (Müller/Haus 2026). Hinzu kommt, dass eine wirtschaftlich rentable Lagerstätte für die Siliziumproduktion mindestens 10 bis 20 Millionen Tonnen enthalten sollte (Müller/Haus 2026).

Die Herstellung von Rohsilizium erfolgt in Lichtbogenöfen bei Temperaturen von ca. 2.000 °C aus Quarzschottern und -kiesen unter Beisetzung von Reduktionsmitteln, wie Kohle oder Koks. Dieser Prozess ist energieintensiv, wobei für die Produktion von einer Tonne Rohsilizium rund 12.500 kWh Strom benötigt werden (DERA 2023). Nicht die Rohstoffkosten, sondern der regionale Strompreis hat somit entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Siliziumproduktion. Das geschmolzene Material sinkt im Ofen nach unten, und die Siliziumschmelze wird zusammen mit der Schlacke in eine Pfanne abgestochen,

in der sie einer oxidativen Pfannenraffination unterzogen wird. Die aus dem Ofen austretende Siliziumschmelze wird mit einem Luft-Sauerstoff-Gemisch durchblasen, das bevorzugt die Hauptverunreinigungen durch Kalzium und Aluminium oxidiert und eine $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ -Schlacke bildet. Das Einblasen des Gases durchmischt die Schmelze und drängt die sich bildende, oben schwimmende Schlacke an den Rand der Pfanne, sodass das Silizium im Zentrum des entstehenden Wirbels weitgehend schlackenfrei bleibt. Während des Gaseinblasens entsteht Siliziumoxidstaub, ein amorpher Quarzstaub, der etwa 8–15 Gew.% des eingesetzten Quarzrohstoffes ausmacht. Eine typische Siliziumschmelzanlage erzeugt 200 bis 400 kg Quarzstaub pro Tonne Siliziummetall. Der Quarzstaub wird in Filtern aufgefangen und üblicherweise weiterverwertet, z. B. als Zusatzstoff für Zement. Abhängig vom durch die Pfannenraffination erzielten Reinheitsgrad werden mehrere Qualitätsstufen unterschieden.

Das gereinigte Rohsilizium wird in Formen gegossen. Nach dem Erstarren werden die Siliziumblöcke zerkleinert, und die Bruchstücke dienen als Ausgangsmaterial für die weitere Verarbeitung zu polykristallinem Silizium (Polysilizium). Die Polysiliziumherstellung hat zum Ziel, den Reinheitsgrad des Rohsiliziums auf über 99,99999999 Gew.% anzuheben, um einen hohen Wirkungsgrad der Solarmodule zu gewährleisten. Die von der weiterverarbeitenden Industrie benutzten Reinheiten sind 7N und 8N ($\geq 99,99999$ Gew.% Silizium; „N“ steht für „Neun“ und gibt an, wie viele Neunen im Reinheitsprozentsatz stehen) für die Herstellung polykristalliner Solarzellen, 9N und 10N für monokristalline Solarzellen, und 11N und 12N für monokristallines Halbleitersilizium zur Mikrochipproduktion (Tongwei 2024). Polysilizium in den Qualitäten 7N bis 9N hat einen Marktanteil ca. 95 % und die der 11N- und 12N-Qualitäten einen Anteil ca. 5 %. Polysilizium wird überwiegend durch das Siemens-Verfahren (im Siemensreaktor) hergestellt, wobei Rohsilizium zunächst zu Trichlorsilan umgesetzt wird. Alternativ wird auch körniges Polysilizium mit dem Wirbelschichtreaktorverfahren (FBR) gewonnen, was aufgrund niedriger Produktionskosten an Bedeutung gewinnt. In China liegt die FBR-basierte Produktionskapazität bei rund 480 000 Tonnen pro Jahr; im Jahr 2024 entfielen damit etwa 14 % der gesamten Polysiliziumproduktion des Landes auf körniges Polysilizium (Shaw und Thompson 2025).

Für die Herstellung von Polysilizium durch das Siemens-Verfahren lässt man gemahlenes Rohsilizium mit Chlorwasserstoff in einem Wirbelschichtreaktor reagieren. Dabei entsteht durch die Reaktion

$\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$ flüssiges Trichlorsilan. Dieses wird anschließend durch Destillation und mittels chemischer Gasphasenabscheidung weiter gereinigt. Das gereinigte Trichlorsilan wird im Siemens-Verfahren zusammen mit Wasserstoff bei Temperaturen von etwa 1000 °C bis 1200 °C unter der Reaktion $\text{HSiCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$ thermisch zersetzt. Dabei scheidet sich hochreines Silizium an Reinstsiliziumstäben ab und kristallisiert zu Polysilizium. Wenn die Stäbe einen Durchmesser von 15 bis 20 cm haben, wird der Prozess beendet und die Stäbe in kleine Stücke zerbrochen. Aus dem Nebenprodukt Siliziumtetrachlorid wird unter anderem hochreiner Quarz hergestellt.

Nach der Polysiliziumproduktion in Form von Siliziumstäben spaltet sich die Wertschöpfungskette in zwei Zweige auf: zum einen in die klassische Wertschöpfungskette, bei der Solarmodule aus polykristallinen Siliziumwafern hergestellt werden, und zum anderen in die relativ neue Wertschöpfungskette, bei der die Modulherstellung aus monokristallinen Siliziumwafern erfolgt (s. Abbildung 1). Im Jahr 2018 bestanden rund 96 % der ausgelieferten Solarzellenmodule aus Polysilizium. Im Jahr 2025 betrug der Anteil der aus Polysilizium gefertigten Module Schätzungen zufolge nur noch etwa 14 %, der Markt wird seither von monokristallinen Solarmodulen dominiert. Monokristalline Module weisen einen höheren Wirkungsgrad von etwa 18–25 % auf, während polykristalline Zellen nur auf etwa 15–17 % kommen und daher als Auslaufmodell gelten. Monokristalline Solarmodule bestehen aus einem einzigen Siliziumkristall. Die Atome sind regelmäßig im Kristallgitter angeordnet und nicht durch Kristallgrenzen gestört, was einen nahezu ungehinderten Elektronenfluss ermöglicht. Dadurch entstehen geringere elektrische Verluste, was sich in einem hohen Wirkungsgrad niederschlägt.

Für die klassische Polysiliziumwaferproduktion werden die Polysiliziumstäbe zerbrochen und in großen Quarzglasriegeln aufgeschmolzen. Nach dem Erstarren und Abkühlen werden die Siliziumblöcke auf Wafer-Standardgrößen zugeschnitten, etwa zu M10-Ingots für quadratische Wafer mit Abmessungen von 182 mm × 182 mm. Anschließend werden die Ingots mit Diamantdrahtsägen in 150 bis 200 µm dünne Wafer zersägt. Dabei fallen pro Wafer etwa 40–95 µm des Materials als Sägemehl an, das wieder in den Prozess der Polysiliziumproduktion zurückgeführt wird.

Für die Produktion von Siliziumeinkristallen für monokristalline Solarmodule wird das Czochralski-Verfahren angewendet. Dabei werden Polysiliziumbruchstücke in einem Quarzglasriegel geschmolzen. Ein

rotierender Impfkristall wird in das geschmolzene Silizium getaucht und langsam wieder herausgezogen. Durch kontrollierte Abkühlung und Rotation entsteht ein zylindrischer Siliziumeinkristall. Tiegel und Kristall rotieren in entgegengesetzte Richtungen, um die Homogenität des wachsenden Kristalls zu gewährleisten. Die Ziehgeschwindigkeit von etwa 0,5 bis 2 mm pro Minute sowie die Temperatur bestimmen den Durchmesser des Einkristalls. Hergestellte Einkristalle können einen Durchmesser von bis zu 300 mm erreichen und sind oft bis mehrere Meter lang. Aus den Kristallen werden anschließend dünne Wafer geschnitten. Das Verfahren ist zwar energieintensiver als die Herstellung polykristalliner Wafer, ermöglicht jedoch die Produktion sehr leistungsfähiger und langlebiger Solarzellen.

Nach dem Sägen werden die polykristallinen bzw. monokristallinen Wafer gereinigt, poliert und chemisch behandelt, um Defekte zu entfernen und die Oberfläche für die Solarzellenherstellung zu optimieren. Ein zentraler Prozessschritt ist die Diffusion (Dotierung): In einem Ofen werden die Wafer zumeist mit Phosphor n-dotiert, um den für die Stromerzeugung notwendigen p/n-Übergang zu erzeugen. Nach der Dotierung wird eine Antireflexbeschichtung, in der Regel eine dünne Siliziumnitridschicht, aufgebracht, um die Lichtreflexion zu minimieren und der Zelle ihr charakteristisches blaues bis schwarzes Aussehen zu verleihen. Anschließend werden Metallpasten, meist auf Silberbasis, auf die Vorder- und Rückseite aufgedruckt, um die elektrischen Kontakte für den Stromfluss zu bilden. Die bedruckten Zellen durchlaufen danach einen Hochtemperaturofen, in dem die Metallkontakte mit dem Silizium versintern und dauerhaft verbunden werden. Häufig werden die Zellen anschließend per Laser in Halbzellen vereinzelt, um den Wirkungsgrad weiter zu steigern.

Die Modulmontage, der letzte Schritt in der der Wertschöpfungskette, umfasst das Verlöten der fertigen Zellen zu Zellsträngen (Strings). Diese werden anschließend zusammen mit Glas, EVA-Folien und einer Rückseitenfolie unter Hitze und Vakuum laminiert. Zum Schluss erhält das Laminat einen Aluminiumrahmen und eine Anschlussdose.

3 Deutschlands und EU-Produktion entlang der Photovoltaik-Wertschöpfungskette

3.1 Rohsiliziumproduktion aus Quarz in Deutschland und der EU

Im Jahr 2025 erreichte die weltweite Produktion von Rohsilizium ca. 4,6 Millionen Tonnen (USGS 2026; Tabelle 1). Circa 25 % davon wurden in der Solar- und Halbleiterindustrie weiterverarbeitet und 38 % bzw. 35 % fließen in die Silikon- bzw. Aluminiumindustrie (DERA 2023). China war 2025 mit etwa 4,0 Millionen Tonnen der größte Produzent. Das entspricht 87 % der weltweiten Rohsiliziumerzeugung (Tabelle 1; USGS 2026). Von den EU27-Ländern ist Frankreich mit ca. 68.000 Tonnen der wichtigste Rohsiliziumproduzent gefolgt von Spanien. Bis Ende 2025 war Deutschland ein bedeutender Produzent von Rohsilizium in Europa. Die RW silicium GmbH verwendete Quarzkiese aus der nahegelegenen Lagerstätte Jederschwing bei Passau und aus dem thüringischen Nobitz sowie importierte Quarzkiese aus Österreich und der Tschechischen Republik (Schmid et al. 2014). Mit der Schließung der Schmelzhütte in Pocking wird seit diesem Jahr jedoch kein Rohsilizium mehr in Deutschland hergestellt.

Ferroglobe, der Hauptproduzent von Rohsilizium in Frankreich, aber auch mit Standorten in Norwegen, hatte im vierten Quartal 2025 den Großteil seiner Siliziumproduktion in Europe vorübergehend stillgelegt (Minexeurope 2025). Drei französische Standorte (Montricher, Les Clavaux und Angletfort) wurden auf Kurzarbeit versetzt, wovon mehr als 400 Beschäftigte betroffen waren. Die vorübergehende Stilllegung wurde mit der einbrechenden Nachfrage und den sinkenden Preisen begründet, die durch kostengünstige Importe verursacht wurden. Die Produktionsaussetzung wird als „eindeutiges Signal für die Bedrohung der industriellen Basis Europas und seiner strategischen Autonomie“ beschrieben (European Parliament 2026).

Der europäische Verbrauch an Rohsilizium wird momentan größtenteils von europäischen nicht-EU27-Ländern gedeckt. Aus China werden nur etwa 8 % des in die EU benötigten Rohsiliziums importiert. Nicht-EU27 Länder mit bedeutender Rohsilizium Produktion sind Norwegen und Island mit 130.000 Tonnen bzw. 16.000 Tonnen (USGS 2026). Bosnia and Herzegowina produziert seit 2004 Rohsilizium, aber ausschließlich für die Aluminiumindustrie. Norwegen ist der größte europäische Rohsilizium-Produzent und der drittgrößte der Welt nach China

und Brasilien (Tabelle 1). Norwegen beliefert hauptsächlich den deutschen und europäischen Markt.

In Norwegen produziert unter anderen die Wacker Chemie AG Rohsilizium, das an die firmeneigenen Standorte in Burghausen in Bayern und Nünchritz in Sachsen exportiert wird. Dort verarbeitet die Wacker Chemie AG das Rohsilizium zu Polysiliziumproduzent weiter, der nächste Schritt in der Photovoltaik-Wertschöpfungskette. Wackers Eigenbedarf an Rohsilizium wird zu einem Drittel (circa 85.000 Tonnen) durch die firmeneigene Schmelzhütte in Holla in Norwegen gedeckt (DERA 2023). Die restliche Menge des von der AG benötigten Rohsiliziums wird gegenwärtig vor allem aus anderen europäischen Ländern, sowie Kanada, Island, Brasilien, Südafrika und Australien bezogen (DERA 2023; BGR 2024). Insgesamt wurden im Jahr 2023 rund 128.000 Tonnen Rohsilizium aus Norwegen nach Deutschland exportiert, was etwa die Hälfte, circa 55 %, aller deutschen Siliziumimporte ausmachte (BGR 2024).

Die grundlegende Voraussetzung für die Produktion von Rohsilizium ist der Zugang zu geeigneten und ausreichend verfügbaren Quarzrohstoffen. Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, müssen diese Quarzrohstoffe spezifische Anforderungen für die Siliziumherstellung erfüllen. Da Quarz für die Siliziumproduktion ein kostengünstiger Rohstoff ist und in großen Mengen verbraucht wird, sollten die Transportwege zwischen Grube und Schmelzhütte möglichst kurz sein. In Europa besteht jedoch ein Mangel an qualitativ geeigneten und bekannten Quarzlagerstätten für die Siliziumproduktion, um eine langfristige Rohsiliziumproduktion bei steigender Nachfrage sicherzustellen (Müller/Haus 2026). Ursache hierfür ist die fehlende strategische Erkundung von Quarzvorkommen infolge des jahrelangen Rückgangs der Siliziumproduktion in Europa und der damit verbundenen ausbleibenden Investitionen.

Tab. 1: Globale Produktion von Rohsilizium der letzten vier Jahre in Tonnen (USGS 2026). k.A. – keine Angaben.

Land	2022	2023	2024	2025
Australien	48000	39000	47000	47000
Brasilien	202000	196000	190000	180000
Kanada	29000	29000	34000	34000
China	2900000	3630000	4800000	4000000
Frankreich	96000	90000	90000	68000
Deutschland	62000	59000	29000	13000
Island	49000	24000	28000	16000
Kasachstan	5000	7000	7000	7000
Norwegen	144000	123000	140000	130000
Russland	54000	54000	59000	35000
Südafrika		13000	15000	10000
Spanien	6000	5000	6000	4000
Bosnien und Herzegowina	k.A.	10000	13000	k.A.
Andere Länder	79000	11000	42000	46000
Welt gesamt	3674000	4360000	5487000	4590000
Europa gesamt	357000	301000	293000	231000
EU27	164000	83000	57000	29000
Prozentuale Anteile				
Europa gesamt	9,7	6,9	5,3	5,0
EU27	4,5	1,9	1,0	0,6
Deutschland	1,7	1,4	0,5	0,3
China	78,9	83,3	87,5	87,1

3.2 Polysilizium- und Silizium-Einkristallfertigung sowie Wafer-sägen – Schlüsselprozesse der Solarmodulwertschöpfung überwiegend außerhalb Europas

Im Jahr 2024 erreichte die weltweite Polysiliziumproduktion – einschließlich der Mengen für Photovoltaik- und Halbleiteranwendungen – rund 1,96 Millionen Tonnen, was einem Anstieg von etwa 20 % gegenüber dem Vorjahr entspricht (International Energy Agency 2025). Von der Gesamtmenge werden schätzungsweise etwa 1,9 Millionen Tonnen für die Solarzellenherstellung verwendet, während der Rest von der Halbleiterindustrie verbraucht wird. Hiervon war China mit einem Anteil von 93 % der mit Abstand größte Produzent, mit weitem Abstand gefolgt von Deutschland (3 %) und den USA (2 %).

Die Wacker Chemie AG mit circa 80.000 Tonnen Jahresproduktion ist der größte Hersteller von Polysilizium in Europa mit Standorten in Burghausen und Nünchritz (Wacker 2026). Mit einem Produktionsstandort in Charleston, Tennessee, USA, produziert die Wacker Chemie AG Polysilizium auch außerhalb Deutschlands. Wacker veredelt Rohsilizium zu hochreinem, elektronischem Polysilizium, ein Zwischenprodukt für Solarzellen und Halbleiterchips.

Für die Weiterverarbeitung des in Form zerbrochener Kristallisationsstäbe vorliegenden Polysiliziums zu Wafern liefert Wacker das Material an verschiedene Hersteller. Ein Teil dieser Hersteller produziert polykristalline Wafer, die im Jahr 2025 rund 14 % der Solarwaferproduktion ausmachen, indem sie Polysiliziumblöcke gießen und diese in Wafer zersägen. Andere Hersteller ziehen aus dem Polysiliziumbruch mittels des Czochralski-Verfahrens Silizium-Einkristalle und schneiden diese anschließend in monokristalline Wafer, die im Jahr 2025 rund 86 % der Solarwaferproduktion ausmachen.

Weitere deutsche Polysiliziumhersteller mit deutlich geringerer Kapazität sind die Silicon Products GmbH in Bitterfeld und die Schmid Polysilicon Production GmbH in Schwarze Pumpe. Europäische Hersteller außerhalb Deutschlands sind die H2GEMINI Technology Consulting in der Schweiz, Elkem Solar in Norwegen und LUX Srl in Italien. Zusammengekommen produzieren die europäischen Hersteller jedoch weniger als 4 % des weltweiten Polysiliziums.

Mit den vorhandenen Kapazitäten der genannten Polysiliziumproduzenten könnte Europa seinen Eigenbedarf an Polysilizium für die Solarwaferproduktion decken. Die Herstellung sowohl polykristalliner als auch monokristalliner Wafer findet jedoch außerhalb Europas statt, davon 96,5 % in China (International Energy Agency 2025). Zweitgrößter Waferproduzent ist mit 2,3 % Vietnam, gefolgt von Malaysia (0,5 %) und Thailand (0,4 %). Die letzten europäischen Hersteller von Silizium-Einkristallen und Polysilizium-Ingots für die Solarwaferproduktion – Norwegian Crystals und NorSun AS – gingen 2023 (NRK 2023) beziehungsweise 2024 (Stedje und Øren 2024) in Konkurs. Zwar werden in Europa Silizium-Einkristalle produziert, allen voran von der Siltronic AG in Freiberg, diese Kristalle sind jedoch ausschließlich für die Halbleiterindustrie bestimmt.

3.3 Solarzellenherstellung und Modulmontage - Deutschland und die EU verlieren an Boden

Da momentan 97 % der Wafer in China produziert werden, finden auch die nachfolgenden Schritte der Wertschöpfungskette – die Herstellung der Solarzellen – überwiegend dort statt; letztere erfolgt derzeit bis zu 90 % in China (International Energy Agency 2025). Mit einem jeweiligen Anteil von circa 2 % folgen Vietnam, Malaysia und Südkorea. Die Hauptakteure der Solarmodulmontage konzentrieren sich ebenfalls in Asien, China mit 86 % an der Spitze, gefolgt von Indien (3,3 %), USA (3,2 %), Vietnam (2,5 %), Thailand (1,5 %) und Malaysia (1,0 %) (International Energy Agency 2025). Noch im Jahr 2010 hielten Europa, die Vereinigten Staaten und Japan bedeutende Marktanteile in der Solarmodulproduktion; heute sind es zusammengenommen knapp 4 %. Nur ein geringer Teil der in Asien produzierten Wafer oder weiterverarbeitete Zellen werden nach Europa exportiert, um dort Module anzufertigen, zusammengenommen 0,2%.

In Deutschland produzieren einige kleinere Hersteller Solarmodule, etwa Heckert Solar in Chemnitz, die IBC SOLAR AG in Bad Staffelstein, die SOLARWATT GmbH in Dresden, AE Solar in Königsbrunn, die BAUER Solar GmbH in Selzen und die AxSun Solar GmbH & Co. KG in Laupheim.

Sowohl deutsche als auch andere europäische Unternehmen, wie LUX Srl, Mr Watt Srl und 3Sun Srl in Italien, Tamesol in Spanien, CW SolarCell in der Türkei, Solaronix SA und H2GEMINI Technology Consulting in der Schweiz, setzen auf spezialisierte Produkte vor allem diktiert durch den momentanen Wohnungs- und Privatkundenmarkt. Einige Unternehmen haben sich auf Solarmodule für Anwendungen im Weltraum spezialisiert, wie der Hersteller Azur Space Solar Power GmbH in Deutschland und Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano - CESI SpA in Italien.

Der ohnehin geringe europäische Marktanteil von 0,2 % an der weltweiten Solarmodulproduktion geht weiter zurück. So werden beispielsweise infolge der Insolvenz der Meyer Burger GmbH mit Modulproduktionsanlagen in Bitterfeld-Wolfen und Hohenstein-Ernstthal Ende 2025 diese Werke voraussichtlich in naher Zukunft geschlossen. Die Produktion, die vom US-amerikanischen Unternehmen Swift Solar übernommen wurde, wird in die USA verlagert (Rist 2026).

Die globale Verlagerung der Wertschöpfungskette hat sowohl Vorteile als auch Herausforderungen mit sich gebracht. Zwar hat sie die

Kosten für Solarmodule weltweit drastisch gesenkt und Solarenergie deutlich zugänglicher gemacht, gleichzeitig aber auch Lücken und Verwundbarkeiten in der europäischen Lieferkette geschaffen. Daher gibt es Initiativen wie die EU Solar Energy Strategy (European Parliament 2024), die auf eine Diversifizierung der Lieferketten, den Wiederaufbau einer vollständigen Wertschöpfungskette in Europa und den Ausbau bestehender Solarproduktionskapazitäten abzielen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Wertschöpfungskette für die Herstellung von Siliziumwafern für Photovoltaikmodule beginnt mit der Erkundung geeigneter Quarz-lagerstätten und deren bergbaulichem Abbau. Auf die Rohstoff-gewinnung folgen mehrere Veredelungsschritte, beginnend mit der Roh-siliziumproduktion, über die Herstellung von Polysilizium und Silizium-einkristallen bis hin zum Sägen der Wafer. Abschließend werden aus den Wafern die Solarzellen produziert und diese zu Solarmodulen montiert.

Noch vor 15 Jahren existierte in Europa die vollständige Wertschöpfungskette der Solarmodulproduktion und deckte die lokale Nachfrage. Inzwischen hat Europa jedoch erhebliche Marktanteile verloren, es sind Lücken in der Wertschöpfungskette entstanden, und der Eigenbedarf an Solarmodulen kann nur durch Importe gedeckt werden.

Mit der Schließung der RW Silicium GmbH in Pocking Ende 2025 gibt es in Deutschland beispielsweise keine Rohsiliziumproduktion mehr. Damit ist die Basis der Wertschöpfungskette für die Silizium-waferproduktion in Deutschland weggebrochen, ebenso die damit verbundene technologische Kompetenz. Europa produziert insgesamt etwa 5 % des weltweit gewonnenen Rohsiliziums, allen voran Norwegen, sodass der Bedarf des innereuropäischen Marktes mit den vorhandenen Kapazitäten grundsätzlich gedeckt werden könnte. Die Rohsiliziumproduktion ist jedoch seit Jahren kontinuierlich rückläufig. Dies steht im Gegensatz zu europäischen Initiativen wie der EU Solar Energy Strategy (European Parliament 2024) und Vorgaben wie dem Critical Raw Materials Act (European Commission 2024), die eine Eigenproduktion von 10 % bei kritischen Rohstoffen wie Silizium bis 2030 anstreben.

Der einzige nennenswerte Akteur an der Basis der Wertschöpfungskette in Europa ist das deutsche Unternehmen Wacker Chemie AG, das Rohsilizium in Norwegen produziert – unter Nutzung lokaler und importierter Quarzrohstoffe. Die Produktion in Norwegen dient der Versorgung der firmeneigenen Standorte in Deutschland und deckt etwa

30 % des Rohsiliziumbedarfs des Unternehmens für die Herstellung von Polysilizium für die Solarzellenproduktion, bei einem weltweiten Marktanteil von rund 3 %.

Es ist hervorzuheben, dass in Europa ein Mangel an qualitativ geeigneten und bekannten Quarzlagerstätten für die Siliziumproduktion herrscht, um eine langfristige Rohsiliziumproduktion bei steigender Nachfrage zu sichern (Müller/Haus 2026). Ursachen hierfür sind die fehlende strategische Erkundung von Quarzvorkommen infolge des jahrelangen Rückgangs der Siliziumproduktion in Europa und die damit verbundenen ausbleibenden Investitionen.

Das von der Wacker Chemie AG und anderen europäischen Herstellern produzierte Polysilizium wird für die Solarwaferproduktion außerhalb Europas exportiert. Damit ist die europäische Wertschöpfungskette für die Solarmodulproduktion an dieser Stelle unterbrochen, da es in Europa derzeit keine Hersteller von Ingots und Wafern gibt, sondern lediglich einige kleinere Zell- und Modulproduzenten. Die Produktion von Wafern für die Solarzellenfertigung findet somit außerhalb Europas statt. Für die Solarzellen- und Solarmodulproduktion gelangt nur ein kleiner Teil der vorwiegend in China produzierten Wafer zurück nach Europa.

In Deutschland existiert nur noch eine geringe, auf Marktnischen spezialisierte Solarmodulproduktion. Zwar gibt es in Europa Initiativen, die den Wiederaufbau einer vollständigen Wertschöpfungskette sowie den Ausbau bestehender Solarproduktionskapazitäten anstreben, doch sind diese Bemühungen bislang wenig erfolgreich. Angesichts hoher Energiepreise und preisgünstiger Importe scheut die Industrie die dafür notwendigen Großinvestitionen.

Im Jahr 2025 beherrschte China alle Stufen der Photovoltaik-Wertschöpfungskette, einschließlich der Produktionskapazitäten für Polysilizium, Wafer, Solarzellen und -module, und ist damit der wichtigste Handelspartner für Deutschland und Europa. Chinas Erfolg in der Solarzellenproduktion beruht auf koordinierten staatlichen Maßnahmen, darunter strategische Planvorgaben, die Solarenergie als zentral für die nationale Energiesicherheit einstufen, staatliche Subventionen, günstige Strompreise, Infrastrukturinvestitionen sowie flankierende Maßnahmen zur Unterstützung der globalen Marktexpansion. Um eine kontinuierliche Versorgung mit Solarmodulen zu sichern, gilt es, gute Handelsbeziehungen mit China zu bewahren und zugleich neue Partnerschaften mit anderen Ländern aufzubauen, um eine breite Diversifizierung zu erreichen.

China und andere südostasiatische Länder haben begonnen, insbesondere den wachsenden Markt in Afrika zu bedienen. Die Vereinigten Arabischen Emirate und Saudi-Arabien tätigen inzwischen umfangreiche Investitionen in den Aufbau der vollständigen Wertschöpfungskette der Solarmodulproduktion – sowohl um ihre eigene Solarstromerzeugung auszubauen als auch, um in den internationalen, vor allem afrikanischen Markt, einzusteigen (Shah 2026). Aufgrund des Investitionsmangels in Europa werden europäische Staaten, einschließlich Deutschland, voraussichtlich kaum am außereuropäischen Markt teilnehmen.

Eine alternative, sich entwickelnde Marktchance, in die Europa und insbesondere Deutschland einsteigen können, ist das Recycling von Solarmodulen. Die typische Lebensdauer von Modulen beträgt etwa 25 bis 30 Jahre; die ersten großen Photovoltaikanlagen sind inzwischen über 30 Jahre alt (z.B. Özkalay et al. 2025). Bereits im Jahr 2030 werden in Deutschland jährlich rund 20 Millionen Einzelmodule zum Recycling anfallen (Enkhardt 2022). Da die Herstellung von Solarmodulen sehr material- und energieintensiv ist, trägt ein effektives Recycling zur nachhaltigen Nutzung von Ressourcen bei. Bevor die erste große Welle ausrangierter Solarmodule den Markt erreicht, bietet sich für die europäischen Länder die Chance, durch Innovationen im Bereich des Recyclings – etwa durch die Rückgewinnung und Nutzung von recyceltem Silizium und die Verarbeitung zu neuen Wafern – Teile der Wertschöpfungskette zu schließen.

Bibliographie

- Aasly, Kurt (2008): *Properties and behavior of quartz for the silicon process*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Astheimer, Sven (2025): *In Pocking geht der Silizium-Ofen aus*. Frankfurter Allgemeine Exklusiv 11. Dezember 2025.
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/kein-silizium-mehr-aus-deutschland-110801232.html>
- BGR (2024): *Deutschland – Rohstoffsituation 2023*. Hannover. 214 S.
<https://doi.org/10.25928/dero-si23>.
- Bundesnetzagentur (2026): *Ausbau Erneuerbarer Energien 2025*. 8. Januar 2026.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2026/20260108_EEG.html.
- DERA (2023): Rohstoffrisikobewertung - Silizium und Ferrosilikolegierungen – Zwischenprodukte auf Basis von Quarz. DERA-Rohstoffinformation 59, Berlin.

- https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/SharedDocs/Downloads/Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-59.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- Ember Energy (2026): *European Electricity Review 2026*. 22. Januar 2026. <https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2026>.
- Enkhardt, Sandra (2022): *Flaxres gelingt Industrialisierung seiner Recyclinganlagen für Solarmodule*. PV Magazine, 22. Juli 2022. <https://www.pv-magazine.de/2022/07/22/flaxres-gelingt-industrialisierung-seiner-recyclinganlagen-fuer-solarmodule/>.
- European Commission (2024): *Critical Raw Materials Act*. 3. Mai 2024. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en
- European Parliament (2024): *EU Solar Energy Strategy*. 15. Dezember 2024. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-repower-eu-plan/file-eu-solar-strategy>
- European Parliament (2026): *Unfair competition from China and protecting the European silicon industry*. 26. Januar 2026. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-10-2026-000282_EN.html#:~:text=Protecting%20a%20French%20and%20European,%5B1%5D%5B2%5D.
- International Energy Agency (2025): *Trends in photovoltaic applications 2025*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. Report IEA PVPS T1-48: 2025. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2025/.
- International Renewable Energy Agency (2026): *Renewable capacity statistics 2026*. März 2026. <https://www.irena.org/Publications/2026/Mar/Renewable-capacity-statistics-2026>.
- International Technology Roadmap for Photovoltaics (2025): *International Technology Roadmap for Photovoltaics – 2024 Results*. 16. Edition. Mai 2025. <https://www.vdma.eu/de/international-technology-roadmap-photovoltaic>.
- MinexEurope (2025): *Europe, citing market pressures and need for fair competition*. 8. September 2025. <https://2025.minexeuropa.com/ferroglobe-plc-suspends-silicon-metal-production-in-europe-citing-market-pressure-and-need-for-fair-competition/>
- Müller, Axel; Haus, Reiner (2026): Quartz-derived solutions for renewable energy production, semiconductors and beyond. Elements 22/3 (Juli), im Druck.
- NRK (2023): *Milliardavtale skulle redde bygdas bjørnesteinsbedrift – nå er de konkurs*. 21. August 2023. https://www.nrk.no/nordland/norwegian-crystals-er-konkurs_-70-personer-mister-jobben-1.16523978
- Özkalay, Ebrar; Quest, Hugo; Gassner, Anika; Virtuani, Alessandro; Eder, Gabriele C.; Vorstoffel, Stefanie; Buerhop-Lutz, Claudia; Friesen, Gabi;

- Ballif, Christophe; Burri, Matthias; Bucher, Christof (2025): „Three decades, three climates: environmental and material impacts on the long-term reliability of photovoltaic modules“. *EES Solar* 1, 580.
<https://www.org.doi/10.1039/d4el00040d>.
- Rist, Oliver (2026): „Meyer Burger: Swift Solar übernimmt Produktionsanlagen für Solarzellen“. *Solarserver* 13. März 2026.
<https://www.solarserver.de/2026/03/13/meyer-burger-swift-solar-uebernimmt-produktionsanlagen-fuer-solarzellen/>.
- Shah, Junaid (2026): „From oil to photovoltaics: The Middle East grows as a global solar manufacturing hub“. *Saur Energy International*, 15. Januar 2026.
<https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/from-oil-to-photovoltaics-the-middle-east-grows-as-a-global-solar-manufacturing-hub-10999225>.
- Schmid, Max; Panwitz, Claudia; Poschlod, Klaus (2014): *Erkundung von Quarzkiesen zur Verwendung in der Siliziumindustrie*. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Energie/Bodensch%C3%A4tze/2014-Erkundung_von_Quarzkiesen_zur_Verwendung_in_der_Siliziumindustrie_UmweltSpezial.pdf.
- Shaw, Vincent; Thompson, Valerie (2025): „Chinese PV Industry Brief: GCL completes switch to FBR polysilicon production“. *PV-Magazine*, 4. April 2025. <https://www.pv-magazine.com/2025/04/04/chinese-pv-industry-brief-gcl-completes-switch-to-fbr-polysilicon-production/>.
- Siemer, Jochen (2025): „1Komma5° verschiebt seine Pläne zur Modulproduktion in Deutschland“. *PV-Magazine*. 6. Mai 2025.
<https://www.pv-magazine.de/2025/05/06/1komma5-verschiebt-seine-plaene-zur-modulproduktion-in-deutschland>.
- Solartech (2025): *Where are solar panels made? Complete 2025 global manufacturing guide*. 15. November 2025. <https://solarteconline.com/blog/where-are-solar-panels-made-global-manufacturing-guide/>.
- Statistisches Bundesamt (2026): „Stromerzeugung aus Photovoltaik und Erdgas erreicht im Jahr 2025 neue Höchstwerte“. Pressemitteilung Nr. 073 vom 6. März 2026.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2026/03/PD26_073_43312.html.
- Stedje, Hanne; Øren, Keth (2024): „No er det slutt – over 70 mistar jobben: – Ein trist dag“. *Sogn Avis*, 17. Dezember 2024.
<https://www.sognavis.no/no-er-det-slutt-over-70-mistar-jobben-ein-trist-dag/s/5-115-1247642>.
- Tongwei (2024): Tongwei Ltd: *Where we get the silicon that powers our solar panels*. 2. April 2024. <https://en.tongwei.cn/blog/158.html>.
- USGS (2026): *Commodity statistics and information - Silicon*. USGS National Minerals Information Center, April 2026.

- <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-silicon.pdf>
- Wacker (2026): *Innovative Chemie und Biotechnologie*. 2. Juni 2026.
<https://www.wacker.com/cms/de-us/home/home.html>.
- Wirth, Harry (2026): „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“. *Fraunhofer ISE*, Fassung vom 15. Januar 2026. www.pv-fakten.de.
- Wood Mackenzie (2026): *China to hold over 80% of global solar manufacturing capacity from 2023-26*, 2. Juni 2026.
<https://www.woodmac.com/press-releases/china-dominance-on-global-solar-supply-chain/>.

Belebung der Uranwirtschaft

Axel Müller

(MLS, Oslo)

Abstract

The EU relies heavily on uranium for nuclear power, which provides roughly 25% of its electricity. Currently 12 of the 27 EU Member States — Belgium, Bulgaria, Czechia, Finland, France, Hungary, the Netherlands, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain and Sweden — operate nuclear power plants. Some of these countries not only produce nuclear electricity but also export it to their neighbors. Uranium, however, faces growing supply-chain risks: the EU is heavily dependent on imports of uranium from Canada, Kazakhstan and Russia, and on Russia for enriched uranium and fuel-rod manufacture. Since 2020, a revival of the uranium industry has been observable, reflected in increasing exploration activities for uranium deposits, rising uranium production, and an increase in the uranium price. Since 2022, nuclear power generation has also been growing again worldwide and in Europe. Germany shut down its nuclear power plants in 2023, but continues to operate a uranium enrichment plant in Gronau, which is exempt from the German nuclear phase-out decisions. Although Germany aims to focus on the supply of renewable energy, it is dependent, particularly in periods of low wind and solar power generation or high demand, on nuclear energy from neighboring nuclear-producing countries such as France, Belgium, Switzerland, and Sweden. Thus, even countries like Germany, which no longer operate nuclear power plants, remain dependent on imports of nuclear energy and are exposed to the associated risks related to uranium supply and delivery. The aim of this article is to provide an overview of nuclear power generation in the EU, as well as of the actors involved in uranium mining and enrichment, with a particular focus on the situation

in the EU. In addition, it discusses the causes of the revival of the uranium industry that has been observed since 2020.

Resümee

Die EU ist in hohem Maße auf Uran für die Kernenergieproduktion angewiesen, die etwa 25 % des Stroms innerhalb der Wirtschaftsunion liefert. Derzeit betreiben 12 der 27 EU-Mitgliedstaaten, Belgien, Bulgarien, Tschechien, Finnland, Frankreich, Ungarn, die Niederlande, Rumänien, die Slowakei, Slowenien, Spanien und Schweden, Kernkraftwerke. Einige dieser Länder produzieren nicht nur nuklearen Strom, sondern exportieren ihn auch an ihre Nachbarländer. Uran sieht sich jedoch wachsenden Risiken in der Lieferkette gegenüber: Die EU ist stark abhängig von Importen von Uran aus Kanada, Kasachstan und Russland sowie von Russland für die Urananreicherung und die Herstellung von Brennstäben. Seit 2020 ist eine Belebung der Uranwirtschaft zu verzeichnen, die sich in steigenden Investitionen in die Uranerz erkundung, steigender Uranproduktion und einem Anstieg des Uranpreises widerspiegelt. Seit 2022 nimmt die Kernenergieproduktion weltweit und in Europa wieder zu. Deutschland hat seine Kernkraftwerke im Jahr 2023 stillgelegt, betreibt aber ein Urananreicherungsanlage in Gronau, die von den deutschen Atomausstiegsbeschlüssen ausgenommen ist. Obwohl Deutschland eine Schwerpunktversorgung mit erneuerbarer Energie anstrebt, ist es insbesondere bei geringer Wind- und Solarenergieproduktion oder hoher Nachfrage unter anderem auf Kernenergie aus den kernenergieproduzierenden Nachbarländern Frankreich, Belgien, der Schweiz und Schweden angewiesen. Damit sind selbst Länder wie Deutschland, die keine Kernkraftwerke mehr betreiben, vom Import nuklearer Energie abhängig und von den damit verbundenen Uranbereitstellungs- und Lieferrisiken betroffen. Ziel dieses Beitrags ist es, einen Überblick über die Kernenergieproduktion in der EU sowie über die Akteure der Uranerzgewinnung und -anreicherung zu geben, mit besonderem Fokus auf die Situation in der EU. Zudem werden die Ursachen der seit 2020 zu beobachtenden Belebung der Uranwirtschaft diskutiert.

Keywords/Schlüsselwörter

Uranium, nuclear energy, Small Modular Reactors, uranium mining, uranium enrichment

Uran, Kernenergie, Kleine Modulare Reaktoren, Uranbergbau, Urananreicherung

1 Einleitung

Auf dem Nuclear Energy Summit, der am 10. März 2026 in Paris stattfand, erklärte die Präsidentin der Europäischen Kommission, Ursula von der Leyen, dass der Ausstieg aus der Kernenergie ein „strategischer Fehler“ gewesen sei, der durch den Iran-Krieg offengelegt worden sei – und zwar durch die anhaltende „vollständige Abhängigkeit“ der EU von Importen fossiler Brennstoffe (Crellin 2026; World Nuclear News 2026a). Um die Abhängigkeit von Importen fossiler Brennstoffe abzumindern, kündigte sie an, die nuklearen Vorschriften der EU zu überarbeiten, um den Bau kleinerer Kernspaltungsreaktoren, sogenannter Small Modular Reactors (SMR), auf Deutsch Kleine Modulare Reaktoren, zu ermöglichen und zu beschleunigen. SMR sind kompakte Kernkraftwerke mit einer geringen elektrischen Leistung von unter 500 Megawatt, die in Fabriken vorgefertigt und als Module an den Einsatzort geliefert werden. Zum Vergleich: Moderne Großreaktoren erreichen eine Leistung von etwa 1.000 bis über 1.600 Megawatt. SMR gelten als potenzielle Lösung für lokale Herausforderungen der Energieversorgung wie zum Beispiel Großrechenanlagen, Fernwärmeerzeugung, Meerwasserentsalzungsanlagen, Prozesswärme für energieintensive Industrien und Strom für die Wasserstoffproduktion. Das erste kommerziell betriebene SMR ist das schwimmende Kernkraftwerk „Akademik Lomonossow“, das seit 2020 Energie für die sibirische Stadt Pewek liefert und das regionale Stromnetz Chaun-Bilibino versorgt (World Nuclear Industry 2024). Im Jahr 2022 nahm der zweite SMR, errichtet von der China National Nuclear Corp., den kommerziellen Betrieb auf und versorgt seither die Stadt Rongcheng in der Provinz Shandong mit elektrischer Energie (Patel 2022). In Europa ist das englische Unternehmen Rolls-Royce eines der führenden Entwickler von SMR (Rolls-Royce SMR 2026). Über seine Tochtergesellschaft Rolls-Royce SMR hat das Unternehmen ein fabrikgefertigtes 470 MW Kernkraftwerk entwickelt.

Auf dem Gipfel kündigte von der Leyen die Bereitstellung eines Fonds in Höhe von 200 Millionen € zur Unterstützung innovativer Nukleartechnologien und -projekte in Europa an. Die Begründung für die EU-Unterstützung ist, dass zwar der Ausbau der Produktion erneuerbarer Energien rasch voranschreitet, Kernenergie jedoch eine stabile, rund um die Uhr verfügbare Grundlastversorgung garantiert und damit Lieferschwankungen der wetterabhängigen, intermittierenden Quellen Wind und Sonne ausgleicht. Ein weiterer Vorteil von Uran als Energierohstoff gegenüber Öl, Gas oder Kohle besteht – neben den

geringeren CO₂-Emissionen – darin, dass vergleichsweise geringe Rohstoffmengen benötigt werden. Es ist daher leichter zu lagern, und Reaktoren müssen nur alle ein bis zwei Jahre neu beladen werden. Das mindert Importabhängigkeiten, da die Lager bis zu mehrere Jahre Import-Unterbrechungen ausgleichen könnten. Die Kombination aus Kernenergie und erneuerbaren Energien wird mittlerweile als ein effizientes Energiesystem angesehen, gestützt durch Energiespeicher, Flexibilitätsoptionen sowie ein entsprechend ausgebautes und angepasstes Stromverteilungsnetz. Dies macht die Kernenergie für die Erreichung der Klimaziele der EU entscheidend, so von der Leyen, auch wenn die Positionen der einzelnen EU-Länder in Bezug auf die Kernenergieproduktion unterschiedlich sind.

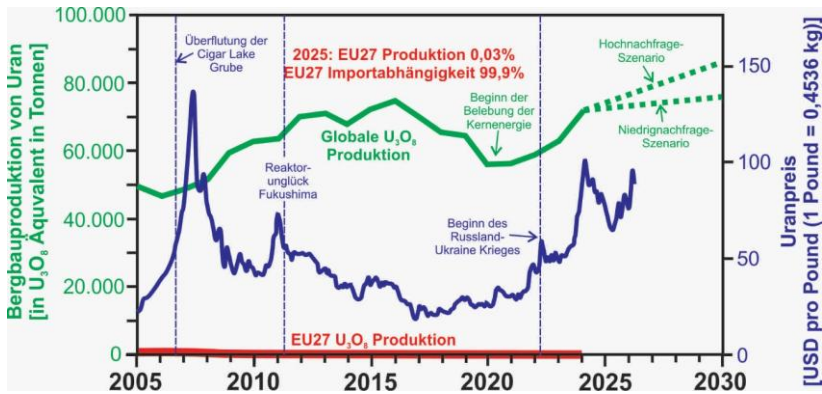


Abb. 1: Entwicklung der Bergbauproduktion von Uran (World Mining Data (2026), Uranpreisentwicklung: www.cameco.com, Niedrig- und Hochnachfrage-Szenarien: International Atomic Energy Agency (2026b).

Seit 2020 nimmt die Förderung von Uranerzen weltweit wieder zu (grüne Linie), nachdem sie seit 2017 rückläufig gewesen war. Hintergrund ist ein globaler Anstieg der Kernenergieerzeugung sowie die Notwendigkeit, die sich leerenden Uranvorräte einzelner Länder wieder aufzufüllen. Der Anstieg des Uranpreises (blaue Linie), insbesondere seit 2022, ist vor allem auf den Russland-Ukraine-Krieg und die damit verbundenen Lieferunsicherheiten bei russischem Uranerz, angereichertem Uran und Uran-Dienstleistungen zurückzuführen.

Die Aussage von Ursula von der Leyen, der Ausstieg aus der Kernenergie sei ein „strategischer Fehler“ der EU-Politik, ist insofern

nicht zutreffend, als dies nur auf einige EU-Länder wie Deutschland zutrifft, die aus der Kernenergieproduktion ausgestiegen sind bzw. einen Ausstieg anstreben. Andere Staaten, allen voran Frankreich, halten an der Kernenergie fest, bauen ihre Kapazitäten seit Jahren systematisch aus und modernisieren bestehende Anlagen. Einige Mitgliedstaaten überdenken zudem ihre bisherigen Ausstiegsbeschlüsse. In 12 der 27 EU-Mitgliedstaaten wird Kernenergie erzeugt und im Jahr 2024 machte Kernenergie 25 % der gesamten Stromproduktion in der EU aus (Eurostat 2026). Zum Vergleich: Der weltweite Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung beträgt rund 12 %. Auch weltweit ist bereits seit 2020 ein Anstieg sowohl der Uranerzgewinnung als auch der Uranpreise zu verzeichnen, was bereits zu diesem Zeitpunkt eine Belebung der Uranwirtschaft belegt (s. Abbildung 1). Seit 2022 steigt in der EU und weltweit auch wieder die Kernenergieproduktion (Abbildung 2).

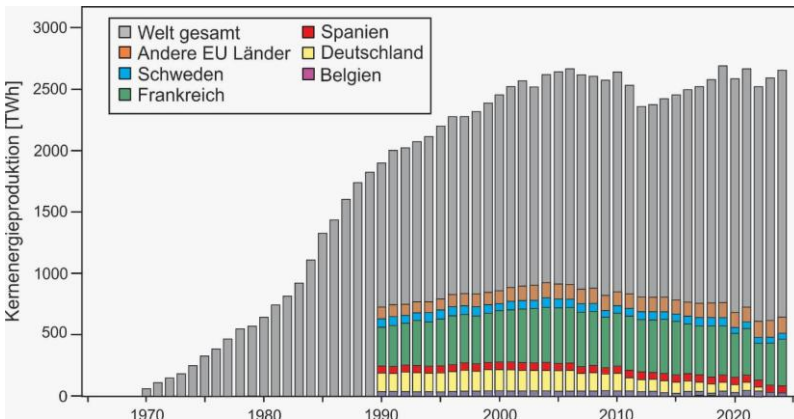


Abb. 2: Kernenergieproduktion weltweit (1970–2024) und seit 1990 nach ausgewählten EU-Ländern. Quellen: World Nuclear Association (2026e), Eurostat (2026).

Ziel dieses Beitrags ist es, einen Überblick über die Kernenergieproduktion in der EU sowie über die Akteure in der Uranerzgewinnung und -anreicherung zu geben, mit besonderem Fokus auf die Situation in der EU. Zur besseren Verständlichkeit wird ebenfalls die Wertschöpfungskette der Uranproduktion und -anreicherung bis hin zum Management abgebrannter Brennelemente skizziert. Im zweiten Teil werden die Risiken entlang der Lieferkette für die Kernenergieproduktion in Europa dargestellt, insbesondere mit Blick auf die gegenwärtige Rolle Russlands

als einen der führenden Uranproduzenten und Anbieter von Kernbrennstoffdienstleistungen. Zudem werden die Ursachen der Belebung der Uranwirtschaft seit 2020 diskutiert.

2 Kernenergieproduktion in der EU - Länderspezifische Strategien und Divergenzen

Im Jahr 2023 hat die EU die Kernenergie – und damit auch den Abbau und die Aufbereitung von Uran – im Rahmen des EU Taxonomy Complementary Climate Delegated Act, der am 1. Januar 2023 in Kraft trat, als nachhaltige Energiequelle mit niedrigen CO₂-Emissionen eingestuft (European Commission 2022b). Diese Einstufung trägt dem Umstand Rechnung, dass Kernenergie über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg nur geringe CO₂-Emissionen verursacht (vergleichbar mit erneuerbaren Energien) und mittlerweile als unverzichtbar für die Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 gilt, bei gleichzeitiger Gewährleistung der Energiesicherheit. Mit dem Inkrafttreten des Taxonomy Complementary Climate Delegated Act werden technologische Entwicklungen und Investitionen in neue Kernkraftwerke innerhalb der EU gefördert, was in den vergangenen Jahren zu einem Anstieg der Kernenergieproduktion in Europa beigetragen hat. Zugleich überdenken mehrere Länder, wie etwa Schweden und Belgien, ihre geplanten Atomausstiegsstrategien.

Auch außerhalb Europas ist eine Zunahme der Kernenergieproduktion und ein Ausbau der Kernenergiekapazitäten zu verzeichnen, mit dem Ziel, wie auf der United Nations Climate Change Conference (COP28) 2023 beschlossen, die Kernenergiekapazität bis 2050 zu verdreifachen (World Nuclear News 2026b). 38 Länder und über 140 Unternehmen haben sich offiziell auf der COP28 dazu verpflichtet. Die EU-Länder unter den Unterzeichnern sind Belgien, Bulgarien, Kroatien, Tschechien, Finnland, Frankreich, Ungarn, Italien, die Niederlande, Polen, Rumänien, Slowakei und Schweden. Derzeit werden weltweit 63 große Kernreaktoren gebaut, und für viele bestehende Reaktoren sind Laufzeitverlängerungen beschlossen worden.

Der Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung in der EU lag 2024 bei etwa 23 %, ein Anstieg um 5 % im Vergleich zum Vorjahr (Eurostat 2026). Deutschland hat seine Kernkraftwerke im Jahr 2023 stillgelegt und setzt darauf, dass erneuerbare Energien und Importe die entstehende Lücke schließen. Deutschland betreibt jedoch nach wie vor eine Urananreicherungsanlage in Gronau in Nordrhein-Westfalen. Sie

wird von der Urenco Deutschland GmbH betrieben und ist von den deutschen Atomausstiegsbeschlüssen ausgenommen (Urenco 2026a).

Derzeit betreiben 12 der 27 EU-Mitgliedstaaten – Belgien, Bulgarien, Tschechien, Finnland, Frankreich, Ungarn, die Niederlande, Rumänien, die Slowakei, Slowenien, Spanien und Schweden – insgesamt 98 Kernkraftwerke. Ähnlich wie Deutschland erzeugen Österreich, Kroatien, Zypern, Dänemark, Estland, Irland, Griechenland, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Polen und Portugal keine Kernenergie, verfolgen jedoch unterschiedliche Strategien im Hinblick auf deren zukünftige Nutzung. Die ungleiche Verteilung der Kernenergieproduktion und die unterschiedlichen Kernenergiestrategien der einzelnen Länder spiegeln nationale Gegebenheiten in Bezug auf geografische Lage, verfügbare Ressourcen, politische Prioritäten und industriegeschichtliche Entwicklung wider.

Frankreich steht für weit mehr als die Hälfte der nuklearen Stromerzeugung der EU und produziert mehr Elektrizität aus Reaktoren als der Rest der EU zusammen (Tabelle 1). Die Produktion von Kernenergie beträgt momentan 71 % der französischen Elektrizitätsversorgung (Statista 2026a). Das Land ist nach den USA der zweitgrößte Atomstromproduzent der Welt und exportiert diesen unter anderem auch nach Deutschland. Frankreich treibt den Ausbau der Kernenergieproduktion in den letzten Jahren verstärkt voran. Die erneuerbaren Energien sollen die zweite Säule der französischen Energieversorgung werden. Der Anteil erneuerbaren Energien betrug im Jahr 2025 24 % (Statista 2026a). Die neue Strategie zur Energieversorgung des Landes sieht den Bau von sechs neuen Atomkraftwerken ab 2038 sowie die Option zum Bau von acht weiteren Kraftwerken vor (World Nuclear News 2026d). Um alle 57 bestehenden Atomkraftwerke am Netz zu halten, wird auf eine Verlängerung der Laufzeit auf 50 oder 60 Jahre gesetzt. Wie Deutschland betreibt auch Frankreich eine Urananreicherungsanlage: Georges-Besse II, die größte Anreicherungsanlage in der EU, die von dem französischen Unternehmen Orano betrieben wird (Orano 2026).

Tab. 1: Kernenergieproduktion und Kernreaktorinventar der kernenergieproduzierenden EU27 Staaten. Quellen: Kernenergieproduktion: Eurostat (2026); Anzahl Kernkraftwerke: International Atomic Energy Agency (2026a).

Land	Kernenergieproduktion [GWh]		Kraftwerke		
	2023	2024	im Betrieb	im Bau	stillgelegt
Frankreich	338.202	380.451	57	0	14
Spanien	56.873	54.510	7	0	3
Schweden	48.470	50.665	6	0	7
Finnland	34.308	32.599	5	0	0
Belgien	32.928	31.255	2	0	5
Tschechien	30.410	29.696	6	0	0
Slowakei	18.333	18.232	5	0	3
Ungarn	15.918	16.017	4	2	0
Bulgarien	16.163	15.777	2	0	4
Rumänien	11.191	10.912	2	0	0
Deutschland	7.216	0	0	0	33
Slowenien	5.603	5.836	1	0	0
Niederlande	3.985	3.574	1	0	1
EU27 gesamt	619.601	649.524	98	2	70

Der zweitgrößte Kernenergieproduzent in der EU ist Spanien. Die sieben in Spanien betriebenen Kernreaktoren erzeugten im Jahr 2025 21 % der Nettostromproduktion des Landes (The Renewable Energy Institute 2026). Spanien hat seine Kapazitäten zur Erzeugung erneuerbarer Energien in den vergangenen Jahren kontinuierlich ausgebaut, die 2025 einen Anteil von 56 % erreichten. Die spanische Regierung plant, alle Großreaktoren bis 2035 stillzulegen. Inzwischen gibt es jedoch Vorschläge, die spanischen Ausstiegspläne aus der Kernenergie zu überdenken (World Nuclear News 2026e).

Schweden ist mit 50 665 GWh der drittgrößte Kernenergieproduzent in Europa. Der Anteil der Kernenergie an der nationalen Stromerzeugung lag im Jahr 2025 bei 28 % (Ember 2026). Die neue schwedische Kernenergiestrategie basiert auf einem grundlegenden Politikwechsel: weg vom schrittweisen Atomausstieg hin zu einem staatlich unterstützten Ausbau – mit dem Ziel, bis 2040 ein zu 100 % fossilfreies Stromsystem und bis 2045 Netto-Null-Emissionen durch eine Kombination aus nuklearer und erneuerbarer Stromerzeugung zu erreichen. Das Land plant, bis 2045 bis zu zehn neue Großreaktoren oder entsprechende Small Modular Reactors (SMR) zu bauen (Kraev 2025). In Söderviken,

nahe dem Kernkraftwerk Forsmark, errichtet Schweden ein unterirdisches Endlager für hochradioaktive, verbrauchte Brennelemente. Dort sollen voraussichtlich ab 2035 bis zu 12 000 Tonnen abgebrannter Kernbrennstoffe in 500 Metern Tiefe eingelagert werden (Dahlström 2025). Ziel ist es, dort dauerhaft die abgebrannten Brennelemente aus den zwölf kommerziellen Reaktoren Schwedens zu lagern, von denen derzeit sechs in Betrieb sind.

In den vergangenen zwei Jahren entfielen rund 40 % der finnischen Stromproduktion auf Kernenergie, ein Großteil davon erzeugt vom größten Reaktor Europas, Olkiluoto 3 (Stenger 2026). Kernenergie ist damit weiterhin die wichtigste Stromquelle des Landes, gefolgt von Windenergie mit einem Anteil von 28 %. Langfristig soll Kernenergie als Grundlastlösung dienen; dabei wird sowohl der Neubau großer Kernkraftwerke in Betracht gezogen als auch die Leistungssteigerung bestehender Reaktoren durch zusätzliche Investitionen. Zudem wird der Bau von SMR geprüft, die vor allem zur Wärmeversorgung von Städten oder großen Industriestandorten – oder in der Kraft-Wärme-Kopplung – eingesetzt werden könnten (Ministry of Economic Affairs and Employment 2025). Seit 2015 baut das finnische Unternehmen Posiva Oy das Endlager in Onkalo aus, das Ende 2026 für die Endlagerung nuklearer Abfälle bereitstehen soll (Posiva 2026). Seit 2024 produziert das finnische Bergbauunternehmen Terrafame zudem Uran als Nebenprodukt der Nickel-Kupfer-Kobalt-Erzaufbereitung in der Mine von Sotkamo (Terrafame 2024).

Belgien, der fünftgrößte Kernenergieproduzent der EU, hatte 2003 gesetzlich beschlossen, bis 2025 vollständig aus der Atomenergie auszuweichen (Gotev 2026). Nachdem infolge des Russland-Ukraine-Krieges im Jahr 2022 eine Energiekrise ausgebrochen war, gewährte die Regierung jedoch zwei Kraftwerken eine Laufzeitverlängerung bis 2035. Die fünf älteren Reaktoren wurden schrittweise und schließlich im Jahr 2025 stillgelegt. Diese Stilllegungen verwandelten Belgien von einem Netto-Stromexporteur in einen Importeur und setzten das Land volatilen Preisen sowie den Netzen der Nachbarländer – vor allem Frankreichs – aus. Nun hat die belgische Regierung eine drastische Kehrtwende vollzogen und die Wiederbelebung der Kernenergie zur energiestrategischen Priorität erklärt. Das Parlament hob im Mai 2025 mit überwältigender Mehrheit das Ausstiegsgesetz von 2003 auf und ebnete damit den Weg für Laufzeitverlängerungen, Wiederinbetriebnahmen und den Bau neuer Reaktoren – einschließlich kleiner modularer Reaktoren (Gotev 2026; Schmalz 2026). Zudem übernimmt der Staat alle Atomkraftwerke der

französischen Firma ENGIE auf belgischem Boden. Die vollständige staatliche Übernahme zielt darauf ab, dem Staat die direkte Kontrolle über ein kritisches Infrastrukturgut zu verschaffen, schnellere Entscheidungen über Wiederinbetriebnahmen und Modernisierungen zu ermöglichen und damit die Ziele der Energiesouveränität und der industriellen Wettbewerbsfähigkeit zu unterstützen.

Die tschechische Energiestrategie sieht den Ausbau der Kernenergie als „Stabilitätssäule“ vor, um Kohle zu ersetzen, die Energieautarkie zu erhöhen und bis 2040 einen Anteil von bis zu 68 % an der nationalen Stromerzeugung zu erreichen (The Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic 2024). Das Kernstück dieses Rahmens ist eine Kombination aus dem Bau von Großreaktoren und kleinen modularen Reaktoren (SMR). Im Jahr 2025 erhielt das südkoreanische Unternehmen Korea Hydro and Nuclear Power (KHNP) den Zuschlag für den Bau eines neuen Kernkraftwerks mit einer Leistung von 1.050 MW in Dukovany (Kiorri 2026). Der staatliche Energieversorger Skupina ČEZ arbeitet mit dem britischen Unternehmen Rolls-Royce SMR zusammen, um 470-MW-SMR-Einheiten in Tschechien zu entwickeln, zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Der erste Rolls-Royce-SMR soll bis 2035 in Temelín ans Netz gehen, bis 2050 sind bis zu fünf weitere Einheiten im ganzen Land geplant. Parallel zum Bau neuer Blöcke sieht die Strategie vor, die Lebensdauer der bestehenden Reaktoren in Dukovany und Temelín durch umfassende Modernisierungen zu verlängern (Group ČEZ 2026).

Die Slowakei verfügt an den Standorten Bohunice und Mochovce über fünf Kernreaktoren, die 62 % zur nationalen Stromerzeugung beitragen (Eurostat 2026). Im Jahr 2024 genehmigte die slowakische Regierung den Bau eines neuen Blocks in Bohunice mit einer Kapazität von rund 1.200 MW und einem geplanten Betriebsbeginn im Jahr 2040 (Dalton 2026). Die Slowakei verfolgt eine ambitionierte Kernenergiestrategie, die darauf abzielt, die Stromerzeugung aus Kernenergie weiter auszubauen, um bestehende Energieabhängigkeiten zu verringern, Klimaneutralität zu erreichen und ihre Position als Nettoexporteur von Elektrizität zu festigen (World Nuclear Association 2026d).

Ungarn verfügt am Standort Paks über vier sowjet-konstruierte WWER-Kernreaktoren, die 42 % der nationalen Stromproduktion erzeugen (Eurostat 2026). Im Jahr 2023 beschloss das staatliche Unternehmen MVM Paks Nuclear Power Plant Ltd., die Betriebsdauer der vier Blöcke in Paks auf 70 Jahre zu verlängern (World Nuclear Association 2026f). Der Standort Paks wird derzeit mit den Blöcken Paks 5 und 6

(bekannt als Paks II) weiter ausgebaut (Berbatović 2026). Der Hauptauftragnehmer, das russische Unternehmen Rosatom, hat Anfang 2026 den ersten Fundamentbeton für Block 5 gegossen; die Aushubarbeiten für Block 6 laufen noch. Die Fertigstellung wird für die Mitte der 2030er-Jahre erwartet. Im Februar 2026 unterzeichneten Ungarn und die USA ein Kooperationsabkommen über den Bau von bis zu zehn in den USA gefertigten SMR, die in Ungarn installiert werden sollen (Vance 2026). Amerikanische Unternehmen wie GE Vernova, Holtec und Westinghouse arbeiten im Rahmen dieser Initiative mit dem MVM zusammen. Ungarn hat seinen Nuklearsektor historisch stark auf Russland gestützt. Im Rahmen dieses Abkommens wird Ungarn erstmals auch Kernbrennstoff von amerikanischen Lieferanten beziehen. Ungarn als Mitglied der Visegrád-Gruppe (V4) richtet seine Kernenergiestrategie zusammen mit Polen, der Slowakei, und Tschechien auf die Erreichung von Energiesouveränität, die Sicherung der Netzstabilität und die Erfüllung der EU-Klimaziele aus. Die vier V4-Staaten bauen ihre Kernenergieproduktion aus und machen sie zum zentralen Baustein ihrer nationalen Energiewende. Polen betreibt derzeit zwar kein Kernkraftwerk, plant jedoch, 2036 ein Großkraftwerk in Betrieb zu nehmen und investiert in die Entwicklung von SMR, unter anderem über das Unternehmen ORLEN Synthos Green Energy (International Atomic Energy Agency 2026c).

Bulgarien verfügt über zwei Kernreaktoren, die rund 40 % seines Stroms erzeugen (World Nuclear Association 2026g). Die bulgarische Kernenergiestrategie zielt darauf ab, alternde Anlagen zu ersetzen und die Kapazitäten auszubauen, um Bulgariens Status als Nettoenergieexporteur zu sichern und eine verlässliche Grundlastversorgung zu gewährleisten. Kernstück dieser Strategie ist das Projekt „Kozloduy New Builds“, das den Bau von zwei neuen Westinghouse-AP1000-Reaktoren (Blöcke 7 und 8) zur Ablösung älterer, sowjetisch konzipierter Reaktoren vorsieht (Balkan Green Energy News 2023).

Die rumänische Kernenergiestrategie zielt darauf ab, die Kernkraftkapazität bis 2032 zu verdoppeln, um die Energiesicherheit zu gewährleisten, die CO₂-Emissionen zu senken und die energetische Unabhängigkeit zu erreichen (World Nuclear Association 2026h). Die Strategie sieht vor, bis Anfang der 2030er-Jahre zwei neue CANDU-6-Reaktoren (Blöcke 3 und 4) am Standort Cernavodă fertigzustellen. Parallel dazu ist eine umfassende Modernisierung des bestehenden Blocks 1 geplant, um dessen Laufzeit zu verlängern. In Partnerschaft mit den USA soll in Doicești ein Kraftwerk mit einer Leistung von 462 MW errichtet werden,

für das Anfang 2026 die endgültige Investitionsentscheidung getroffen wurde (International Trade Administration 2025).

In Slowenien liefert das Kernkraftwerk Krško, das gemeinsam mit Kroatien betrieben wird, über ein Drittel des nationalen Stroms. Die Betriebsdauer des Kraftwerkes ist bis mindestens 2043 vorgesehen, mit einer möglichen Verlängerung bis 2063 (International Atomic Energy Agency 2026d). Slowenien plant einen neuen Großreaktor (JEK2) zu bauen und prüft die Errichtung von SMR (Vujasin 2023).

Mit einem Anteil von nur etwa 3 % trägt die Kernenergie in den Niederlanden derzeit nur in geringem Umfang zur Energieversorgung des Landes bei. Die Stromerzeugung in den Niederlanden ist jedoch mit rund 48 % nach wie vor stark von fossilen Brennstoffen abhängig. Um den Anteil fossiler Energieträger zu verringern, setzt das Land verstärkt sowohl auf den Ausbau der erneuerbaren Energien als auch auf den Ausbau der nuklearen Erzeugungskapazitäten. Obwohl die ursprüngliche Betriebsgenehmigung des einzigen Kernkraftwerks, Borssele, im Jahr 2033 auslaufen sollte, hat die Regierung ihren Ausstiegsbeschluss rückgängig gemacht (World Nuclear Association 2026i). Darüber hinaus treibt die niederländische Regierung den Bau neuer Großreaktoren voran und strebt bis zu vier neue Blöcke an (World Nuclear Association 2026i). Die Entwicklung der ersten beiden Anlagen hat begonnen, mit dem Ziel, sie etwa 2035 in Betrieb zu nehmen (European Nuclear Society 2026). Die Niederlande betreiben in Almelo die zweitgrößte Urananreicherungsanlage der EU, die – wie die deutsche Anlage – von dem Unternehmen Urenco betrieben wird (Urenco 2026b).

Von den momentan nicht Kernenergieproduzierenden Ländern, betreibt neben Polen, auch Estland ein Kernenergieprogramm. Estlands Kernenergieprogramm zielt darauf ab, bis 2035 zwei SMR zu errichten, um Ölschieferkraftwerke zu ersetzen, die Energieunabhängigkeit zu gewährleisten und die Netto-Null-Ziele zu erreichen (World Nuclear Association 2026i). Der Staat erarbeitet derzeit seinen regulatorischen Rahmen sowie Raumordnungspläne, angeführt von dem privaten Energieunternehmen Fermi Energia (Dalton 2025). Die lettische Kernenergiestrategie besteht in einer Zusammenarbeit mit dem Nachbarland Estland bei dessen geplanten Kernkraftwerksprojekten. Lettland prüft, ob es als Mitentwickler oder als finanzieller Investor in das estnische Kernenergieprogramm einsteigen soll (Dyer 2026).

3 Wertschöpfungskette der Urangewinnung und -aufbereitung für die Kernenergieerzeugung

Die Wertschöpfungskette der Urangewinnung und -aufbereitung für Kernenergiegewinnung beginnt mit der Erkundung von Uranlagerstätten, gefolgt vom Abbau des identifizierten Uranerzes (Abbildung 3).

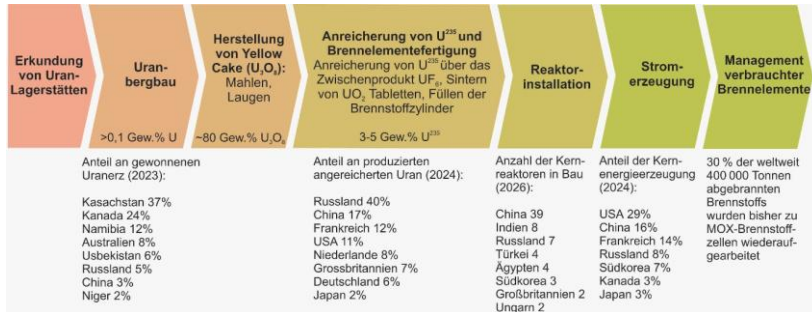


Abb. 3: Vereinfachte Wertschöpfungskette von der Urangewinnung über die Aufbereitung und Verarbeitung zu Brennstäben bis hin zur Stromerzeugung und zum Management verbrauchter Brennelemente. Für die einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette sind die Anteile der führenden Produktionsländer angegeben. Quellen: Uranerzabbauende Länder: World Mining Data (2026), Urananreicherung: Thunder Said Energy (2024), Anzahl der Kernreaktoren in Bau: Statista (2026b), Berbatović (2026).

Die häufigsten Uranminerale in Uranerzen sind Uraninit (UO₂), Pechblende (eine schwarze, massive Variante von Uraninit), Coffinit (U(SiO₄)_{1-x}(OH)_{4x}), Brannerit ((U,Ca,Fe,Y,Th)₃Ti₂O₆), Davidit ((Fe,Ca,U,Ca,Ti)₆O₁₅), Carnotit (K₂(UO₂)₂(VO₄)₂ · 3H₂O), Autunit (Ca(UO₂)₂(PO₄)₂ · 10-12H₂O), Torbernit (Cu(UO₂)₂(PO₄)₂ · 12H₂O) und Uranophan (Ca(UO₂)₂(SiO₃)₂(OH)₂ · 5H₂O). Das uranhaltige Erz wird entweder im Tagebau oder Untertagebergbau gewonnen – durch Abbau des Gesteins – oder mittels Laugungsbergbau direkt im Untergrund aus dem Wirtsgestein gelöst. Das Laugungsbergbauverfahren, insbesondere In-Situ Recovery bzw. In-Situ Leaching, macht mehr als die Hälfte der weltweiten Uranproduktion aus und wird in Kasachstan, Usbekistan, den USA, Australien, China und Russland angewendet (World Nuclear Association 2026a). Dabei wird Uran durch Laugung direkt aus untertägigen Erzlagern gewonnen, indem die Lauge das aufge-

lockerte Wirtsgestein durchströmt und anschließend als uranangereicherte Lösung wieder aufgefangen wird. Der typische Cut-off-Gehalt für Uran im Bergbaubetrieb liegt im Allgemeinen zwischen 0,02 % und 0,05 % U (200 bis 500 ppm) (World Nuclear Association 2025a). Im Fall des bergbaulichen Abbaus wird das Erz gebrochen und gemahlen und dann erst gelaugt, um das Uran mit starken Säuren wie Schwefelsäure aus dem Gesteinsmehl zu lösen. Die sowohl durch die In Situ Laugung als auch die Gesteinsmehllaugung gewonnen uranangereicherte Flüssigkeit wird gefiltert und chemisch gereinigt und in riesigen Trocknern oder Röstöfen erhitzt, um das Wasser zu entziehen. Das Zwischenprodukt ist ein gelbliches Konzentrat namens Yellowcake, hauptsächlich in der chemischen Form von Triuranooctoxid (U_3O_8).

Im nächsten Schritt der Wertschöpfungskette wird der Yellowcake in chemischen Anlagen zu gasförmigem Uranhexafluorid (UF_6) umgewandelt. Dies ist notwendig, da das spaltbare Uranisotop ^{235}U zur Anreicherung in gasförmiger Form vorliegen muss, um die Trennung vom nicht-spaltbaren Uranisotop ^{238}U zu ermöglichen. Dazu wird der Yellowcake in Salpetersäure (HNO_3) gelöst. Von der Lösung werden Verunreinigungen entfernt, mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion, um eine reine Uranylнитrat-Lösung zu erhalten, die anschließend erhitzt wird, um Urantrioxid (UO_3) in Pulverform zu erzeugen. Das UO_3 -Pulver wird dann bei hohen Temperaturen mit Wasserstoffgas (H_2) reduziert, sodass Urandioxid (UO_2) entsteht (Reaktion: $\text{UO}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{UO}_2 + \text{H}_2\text{O}$). Im Hydrofluorierungsprozess wird UO_2 mit Fluorwasserstoff (HF) umgesetzt, wodurch Uran(IV)-fluorid (UF_4) entsteht, auch bekannt als „Green Salt“ (Chemische Reaktion: $\text{UO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{UF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$). Während der anschließenden Umwandlung zu UF_6 – der Fluorierung – wird UF_4 in einem Wirbelschichtreaktor mit Fluorgas (F_2) umgesetzt, um UF_6 zu erzeugen (Chemische Reaktion: $\text{UF}_4 + \text{F}_2 \rightarrow \text{UF}_6$). Das entstehende gasförmige UF_6 wird kondensiert und für den Transport zu den Anreicherungsanlagen in spezielle Zylinder gefüllt. In den Anreicherungsanlagen wird das spaltbare ^{235}U Isotop, das in natürlichem Uran einen Anteil von nur 0,7 % hat, in Zentrifugen auf eine Konzentration von 3–5 % erhöht. Zur Brennelementefertigung wird das angereicherte UF_6 in Urandioxid-Pulver (UO_2) umgewandelt, zu kleinen Tabletten (Pellets) gepresst, in Metallrohre gefüllt, die aus einer korrosionsbeständigen Zirkoniumlegierung bestehen. In der EU befinden sich Urananreicherungsanlagen in Frankreich, den Niederlanden und Deutschland, die zusammen etwa 27 % der weltweiten Kapazitäten zur Urananreicherung

stellen. Aufgeschlüsselt nach Ländern entfallen rund 12 % auf Frankreich, 8 % auf die Niederlande und 6 % auf Deutschland (Uneco 2026a, 2026b; Orano 2026; Eurostat 2026).

Die Brennstäbe werden anschließend zu Brennelementen (Bündeln) zusammengefasst. Je nach Reaktortyp besteht jedes Brennelement aus 179 bis 264 Brennstäben. Ein typischer Reaktor wird mit 121 bis 193 Brennelementen geladen (US Energy Information Administration 2026). Das Platzieren der Brennelemente nebeneinander und das Hinzufügen von Wasser löst die Kernreaktion aus und es wird Wärme erzeugt. In der Regel tauschen die Reaktorbetriebe alle 12 bis 24 Monate etwa ein Drittel des Reaktorkerns aus (40 bis 90 Brennelemente).

Mit der Zeit werden Brennelemente hochradioaktiv und müssen aus dem Reaktorkern entfernt werden. Zu diesem Zweck werden sie vorübergehend in Wasserbecken gelagert, um den Brennstoff zu kühlen und die Freisetzung von Strahlung zu verhindern. Abgebrannter Kernbrennstoff sammelt sich weltweit mit einer Rate von ungefähr 7 000 Tonnen Schwermetall pro Jahr in Zwischenlagern an, und der derzeit gelagerte Bestand liegt bei rund 400 000 Tonnen Schwermetall (World Nuclear Association 2026c). Die Menge an abgebranntem Kernbrennstoff wird in Tonnen Schwermetall angegeben, um das Gewicht des tatsächlich spaltbaren oder potenziell nutzbaren Materials präzise zu erfassen.

Verbrauchte Brennstoffe werden zum Teil wiederaufgearbeitet, um spaltbares Material – ungenutztes Plutonium und Uran – zurückzugewinnen und so neuen Brennstoff bereitzustellen. Mit der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente lassen sich etwa 25–30 % mehr Energie aus dem ursprünglich eingesetzten Uran gewinnen (International Atomic Energy Agency 2026b). Dadurch wird das Volumen des als hochradioaktiver Abfall zu entsorgenden Materials reduziert. Einige Länder wie Frankreich, Russland, China und Japan verfolgen eine Politik der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente, während die Regierungen vieler anderer Länder abgebrannten Brennstoff bislang noch nicht als Ressource, sondern weiterhin als Abfall ansehen. Bisher wurden etwa 30 % der 400 000 Tonnen abgebrannten Brennstoffs zu Mischoxid-Brennstoff (MOX) wiederaufgearbeitet, der inzwischen fast 5 % des eingesetzten Brennstoffs ausmacht (World Nuclear Association 2026c). In der EU ist Frankreich das einzige Land, das abgebrannten Kernbrennstoff zu MOX-Brennstoff aufbereitet – im Jahr 2024 waren es 82 Tonnen Schwermetalläquivalent (Eurostat 2026).

Der Übergang zu schnellen Neutronenreaktoren der vierten Generation wird sowohl das Recycling von Brennstoff als auch die großen Halden an abgereichertem Uran aus Urananreicherungsanlagen in eine Brennstoffquelle verwandeln. China war das erste Land, das einen Demonstrationsreaktor der vierten Generation 2022 in Betrieb nahm, den SMR HTR-PM in Rongcheng in der Provinz Shandong (World Nuclear News 2021; Patel 2022).

Der letzte Schritt im Kernbrennstoffkreislauf besteht darin, die abgebrannten Brennelemente, die nicht wiederaufbereitbar sind, aus den Zwischenlagern abzuziehen, um sie schließlich in einem Endlager tief unter der Erde dauerhaft zu deponieren. Hierfür werden in Europa tiefgelegene Endlager in Finland, Schweden und Frankreich ausgebaut, die voraussichtlich zwischen 2024 und 2035 in Betrieb gehen sollen (Andra 2025; Dahlström 2025; Pisova 2026).

4 Uranbergbau – der Wiedereinstieg der EU

Entsprechend den auf der United Nations Climate Change Conference (COP28) im Jahr 2023 beschlossenen Zielen sollen die weltweiten Kernenergiekapazitäten bis 2050 verdreifacht werden (World Nuclear News 2026b). Dieser Zuwachs soll sowohl durch den Neubau von Kernreaktoren – mit einem bedeutenden Anteil an SMR – als auch durch Laufzeitverlängerungen bestehender Reaktoren erreicht werden. Die USA sind der größte Uranverbraucher (US Energy Information Administration 2024) und stehen für 27 % der globalen Urannachfrage (World Nuclear Association (2026k). Durch den Ausbau der Anlagen und die Belegung der Kernenergieproduktion steigt die Urannachfrage und der Uranpreis (s. Abbildung 1), und die Uranerzermittlung gewinnt an Dynamik (s. Abbildung 2).

Der Uranbergbau ist heute auf wenige Länder und – noch spezifischer – auf einige wenige Gruben konzentriert, was die Rohstoffversorgung generell sehr anfällig macht. Das beste Beispiel dafür ist die Überflutung der kanadischen Uranlagerstätte Cigar Lake im Oktober 2006, ausgelöst durch einen Felssturz im Untertagebereich. In Kombination mit einer steigenden Nachfrage nach Uranerz in dieser Zeit führte der Produktionsausfall der Cigar-Lake-Lagerstätte, die erst 2010 wieder vollständig in Betrieb genommen werden konnte, zu einer Verdreifachung des Uranpreises innerhalb eines Jahres (s. Abbildung 1; Macalister 2006). Nichtsdestotrotz besteht der Vorteil von Uran als

Energierohstoff gegenüber Öl, Gas oder Kohle darin, dass vergleichsweise geringe Mengen benötigt werden und Reaktoren nur alle ein bis zwei Jahre neu beladen werden müssen. Das bedeutet, dass die für einen längeren Zeitraum benötigten Mengen gelagert werden können, um mögliche Importausfälle auszugleichen.

Kasachstan ist heute mit etwa 38 % der weltweit führende Uranproduzent, gefolgt von Kanada mit rund 24 %, das für Lagerstätten wie Cigar Lake bekannt ist, und Namibia mit etwa 12 %, wo große Tagebaubetriebe wie Husab und Rössing betrieben werden (World Nuclear Association 2026b; Abbildung 4). Zusammen fördern diese drei Länder rund drei Viertel der weltweiten Uranmenge, die im Jahr 2024 71.437 Tonnen U_3O_8 betrug (World Mining Data 2026; s. Abbildung 1). Australien liefert etwa 8 % der globalen Uranproduktion, hauptsächlich aus der Lagerstätte Olympic Dam. Weitere bedeutende Produzenten sind Usbekistan mit rund 7 %, Russland mit etwa 5 % und China mit etwa 3 %. Aufgrund der steigenden Nachfrage wird der weltweite Verbrauch voraussichtlich bis 2050 auf mindestens 100.000 Tonnen Uran zunehmen (International Atomic Energy Agency 2026b; s. Abbildung 1) und es wird wieder verstärkt in die Uranerkundung investiert (Abbildung 5).

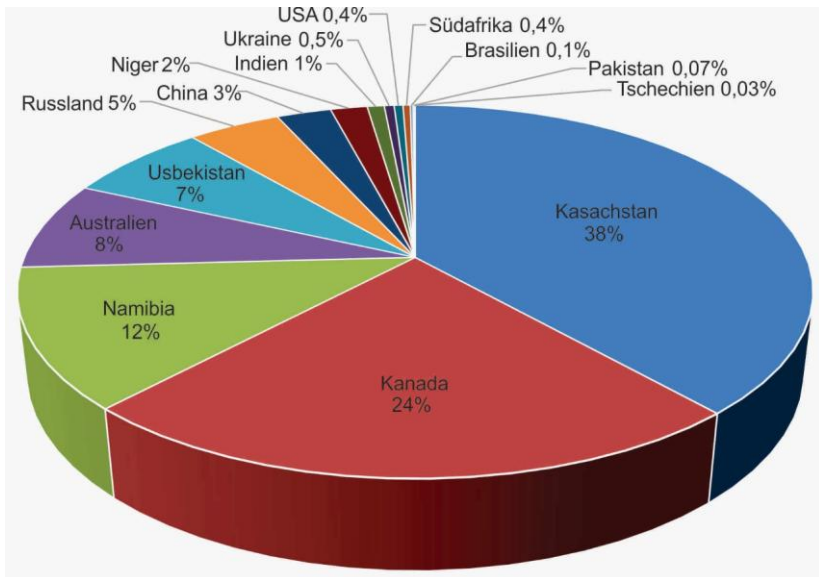


Abb. 4: Prozentualer Anteil der Länder an der Uranerzproduktion. Datenquelle: World Mining Data (2026).

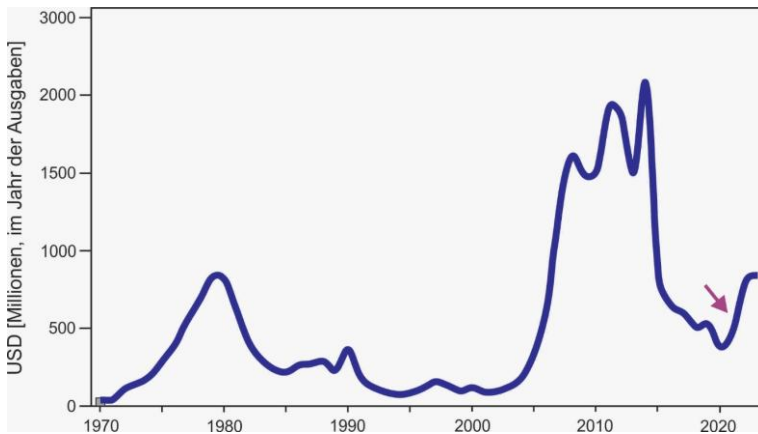


Abb. 5: Summe der nationalen Ausgaben für Uranerkundung und -Grubenerschließung von 27 berichtenden Ländern im Zeitraum 1970 bis 2023. Seit 2020 nehmen die Investitionen wieder zu. Quelle: Nuclear Energy Agency (2025).

In der EU produziert Tschechien nach wie vor Uran, derzeit etwa 20 Tonnen U_3O_8 pro Jahr, als Nebenprodukt der Sanierung des Abraums aus früherem Uranbergbau mittels In-Situ-Laugung sowie der Behandlung von Grubenabwässern (Diamo 2026).

Seit Juni 2024 produziert die finnische Bergbaufirma Terrafame von der Sotkamo Grube in Finnland Uran als Nebenprodukt der Aufbereitung von Nickel-Kupfer-Kobalt-Erz (Terrafame 2024). Die Aufbereitungsanlage des Unternehmens ermöglicht es, die geringe Konzentration von Uran im Erz als Nebenprodukt zu nutzen. Nach der Anlaufphase 2024-2025, soll die Aufbereitungsanlage 2026 mit voller Kapazität arbeiten und 200 Tonnen Uran pro Jahr produzieren (Wise Uranium 2024). Das von Terrafame zurückgewonnene Uran wird zur weiteren Anreicherung exportiert. In den kommenden Jahren kann das im Ausland zu Brennstäben verarbeitete Uran voraussichtlich etwa die Hälfte des für die finnischen Kernkraftwerke benötigten Urans decken (Dalton 2023). Schweden arbeitet daran, sein Verbot der Uranförderung aufzuheben (Sveriges Riksdag 2025).

Die EU ist jedoch nach wie vor stark von Uranerzimporten abhängig. Im Jahr 2024 importierte die EU 13.987 Tonnen Uran (Euratom Supply Agency 2025). Nach Angaben der EU-Atomgemeinschaft Euratom lieferte Kanada im Jahr 2024, dem jüngsten Jahr mit vorliegenden Daten, 34 % des Uranrohstoffes für die EU, gefolgt von Kasachstan mit 24 %

und Russland mit rund 16 % (Euratom Supply Agency 2025). Als derzeit kritisch bewertet die EU insbesondere die Importabhängigkeit von Russland. Daher hat sie sich zum Ziel gesetzt, die Einfuhren von russischem Uran bis Ende 2027 zu beenden (European Commission 2022a, 2026).

5 Russlands aktuelle Rolle als Kernbrennstoffdienstleister für die EU

Neben den Bestrebungen der EU ihre Abhängigkeit von russischen fossilen Brennstoffen zu reduzieren, besteht eine ähnliche aber geringere Rohstoff-Energieabhängigkeit von Russland nicht nur bei dem Uranrohstoff als Kernbrennstoff, sondern über die gesamten Brennstoffkreislauf-Dienstleistungen (s. Abbildung 3). Russland kontrolliert über den staatlichen Konzern Rosatom einen großen Teil der globalen Versorgungskette für Kernbrennstoff. Russland verfügt über rund 40 % der weltweiten Kapazitäten zur Urananreicherung (Thunder Said Energy 2024), und ist der Hauptbetreiber und -lieferant für WWER-Reaktoren weltweit, einschließlich in Mittel- und Osteuropa (World Nuclear Association 2025b). Die schrittweise Verringerung und letztliche Beendigung der Abhängigkeit der EU von russischen Energierohstoffimporten durch Energieeinsparungen, den beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien und die Diversifizierung der Bezugsquellen wurde in der Versailles-Erklärung und im REPowerEU-Plan 2022 festgeschrieben (European Commission 2022a, 2026).

Die Slowakei, Ungarn, Tschechien, Bulgarien und Finnland betreiben insgesamt 19 sowjetisch konstruierte WWER-Reaktoren (World Nuclear News 2026c). In der Slowakei erzeugen WWER-440-Reaktoren 62 % der nationalen Stromproduktion (Eurostat 2026), in Ungarn stellen sie 42 % der Stromversorgung bereit (Eurostat 2026). Die meisten WWER-Reaktoren sind für eine Betriebsdauer von 60 Jahren ausgelegt, mit der Option einer Laufzeitverlängerung auf bis zu 80 Jahre. Das bedeutet, dass einige dieser Reaktoren noch weit in die 2060er-Jahre hinein Brennstoff benötigen werden, die neuesten Einheiten im slowakischen Mochovce sogar bis in die 2100er-Jahre. Der Betrieb der WWER-Reaktoren ist nach wie vor von russischem Brennstoff und den dazugehörigen Dienstleistungen abhängig. Im Unterschied zu neueren Reaktordesigns, für die es mehrere Brennstofflieferanten gibt, können WWER-440-Reaktoren nahezu ausschließlich mit Brennstoffzellen des russischen Herstellers TVEL

bestückt werden. Das französische Unternehmen Framatome und das US-amerikanische Unternehmen Westinghouse haben inzwischen Verträge mit europäischen Ländern geschlossen, um alternative Brennstoffe für WWER-Kernkraftwerke zu entwickeln und die russischen Lieferungen bis 2028 auslaufen zu lassen (World Nuclear News 2026c).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Seit 2020 steigen die Finanzierung der Uranerkundung, die Förderung von Uranerzen, der Uranpreis und seit 2022 auch wieder die Kernenergieproduktion. Das bedeutet, dass seit 2020 eine Belebung der Uranwirtschaft sowohl weltweit als auch in Europa stattfindet – unabhängig davon, dass die einzelnen EU-Länder unterschiedliche Strategien verfolgen. Die wichtigsten Ursachen für die Belebung sind:

- ein schnellerer Ausstieg aus der Verwendung fossiler Brennstoffe für die Energieproduktion
- eine steigende Nachfrage nach einer kontinuierlichen und verlässlichen Energieversorgung, vor allem für den Betrieb großer Rechenzentren
- die erfolgreiche Inbetriebnahme der ersten Small Modular Reactors (SMR) auf dem schwimmenden Kernkraftwerk „Akademik Lomonossow“ im Jahr 2020 und damit der Nachweis, dass SMR flexible und relativ schnell installierbare Systeme sind und eine Alternative zu konventionellen Großreaktoren darstellen.

Nach 2020 wurde diese Belebung beschleunigt durch die Versorgungskrise bei fossilen Brennstoffen, ausgelöst durch Embargos gegen Russland im Zusammenhang mit dem Russland-Ukraine-Krieg, sowie durch das Inkrafttreten des EU Taxonomy Complementary Climate Delegated Act am 1. Januar 2023, der Kernenergie als kohlenstoffarme, nachhaltige Energiequelle klassifiziert.

Die Kernenergieproduktion liefert derzeit rund 24 % des Stroms in der EU (weltweit etwa 12 %), Tendenz steigend. Zurzeit betreiben 12 der 27 EU-Mitgliedstaaten insgesamt 98 Kernkraftwerke. Frankreich, Schweden, Slowenien, die Slowakei, Finnland, Belgien, Tschechien, Ungarn, Bulgarien, Rumänien und die Niederlande bauen ihre Kernenergieproduktion weiter aus. Polen und Estland streben den Einstieg in die Kernenergie an. Finnland fördert seit 2024 Uranerz, und Tschechien gewinnt weiterhin Uran im Rahmen der Sanierung ehemaliger Bergbaugebiete. Die EU ist zu 99,9 % von Uranerzimporten abhängig; davon

stammen - Stand 2024 - rund 16 % aus Russland. Die EU koordiniert den Ausstieg aus den Importen von russischem Uranerz bis Ende 2027 sowie die Verringerung der Abhängigkeit von Brennelementen und Brennstoffdienstleistungen. Für Deutschland, das 2023 sein letztes Kernkraftwerk stillgelegt hat, aber weiterhin eine Urananreicherungsanlage betreibt, bedeutet dies, dass die Importe von Kernenergie aus den kernenergieproduzierenden Nachbarländern Frankreich, Belgien, der Schweiz und Schweden zunehmen werden.

Insgesamt zeigt sich eine Belebung der Kernenergieproduktion, und etwa die Hälfte der EU-Mitgliedstaaten strebt eine Kombination aus Kernenergie und erneuerbaren Energien an. Kernenergie wird damit ein zentraler Bestandteil der europäischen Stromerzeugung bleiben.

Bibliographie

Andra (2025): *Cigeo*. 2. Juni 2026.

<https://international.andra.fr/solutions-long-lived-waste/cigeo>.

Balkan Green Energy News (2023): *Bulgaria's 2053 energy strategy: coal until 2030, new nuclear capacities*. 18. Januar 2023.

<https://balkangreenenergynews.com/bulgarias-2053-energy-strategy-coal-until-2030-new-nuclear-capacities/>.

Berbatović, Vladimir (2026): „Hungary's Paks 2 nuclear power plant officially under construction“. *Balkan Green Energy News*, 6. Februar 2026. <https://balkangreenenergynews.com/hungarys-paks-2-nuclear-power-plant-officially-under-construction/>.

Cameco (2026): *Uranium price*. 30. April 2026.

<https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>.

Crellin, Zac (2026): „EU chief: Phasing out nuclear power was a ‘strategic mistake’“. *Deutsche Welle*, 3 March 2026.

<https://www.dw.com/en/europe-eu-nuclear-power-strategic-mistake/a-76289274>

Dahlström, Mattias (2025): *One of the world's first final repositories for spent nuclear fuel is being built in Forsmark*. 3. November 2025.

<https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2025/one-of-the-worlds-first-final-repositories-for-spent-nuclear-fuel-is-being-built-in-forsmark/>.

Dalton, David (2023): *Finland - State company plans uranium recovery for use in nuclear power plants*. 3 January 2023.

<https://www.nucnet.org/news/state-company-plans-uranium-recovery-for-use-in-nuclear-power-plants-1-2-2023>.

- Dalton, David (2025): „Estonia begins planning process for Small Modular Reactor Nuclear plant“. *Nucnet*, 22. Mai 2025.
<https://www.nucnet.org/news/estonia-begins-planning-process-for-small-modular-reactor-nuclear-plant-5-4-2025>.
- Dalton, David (2026): „Slovakia planning agreement with US on nuclear energy, says PM“. *Nucnet*, 12. Januar 2026.
<https://www.nucnet.org/news/slovakia-planning-agreement-with-us-on-nuclear-energy-says-pm-1-1-2026>.
- Diamo (2026): *AMO, state enterprise, Stráž pod Ralskem*. 10. Juni 2026.
<https://www.diamo.cz/en/company-profile>.
- Dyer, John (2026): „Latvian government launches costly study: could Latvia have a nuclear power plant?“. *SightlineU3O8*, 30. Januar 2026.
<https://sightlineu3o8.com/2026/01/latvian-government-launches-costly-study-could-latvia-have-a-nuclear-power-plant/>.
- Ember (2026): *Sweden: Power sector overview*. 14. April 2026.
<https://ember-energy.org/countries-and-regions/sweden/>.
- Euratom Supply Agency (2025) *Euratom Supply Agency Annual Report 2024*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
<https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/297623/ESA%20Annual%20Report%202024.pdf>.
- European Commission (2026): *REPowerEU – phase out of Russian energy imports*. 22. April 2026.
https://energy.ec.europa.eu/strategy/repowerEU-phase-out-russian-energy-imports_en.
- European Commission (2022a): *Informal meeting of the Heads of State or Government - Versailles Declaration*. 10. März 2022.
<https://www.consilium.europa.eu/media/54773/20220311-versailles-declaration-en.pdf>.
- European Commission (2022b): *EU taxonomy: Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonization*. 2. Februar 2022.
https://finance.ec.europa.eu/publications/eu-taxonomy-complementary-climate-delegated-act-accelerate-decarbonisation_en.
- European Nuclear Society (2026): *EPZ Vision 2033 – A strategy for Dutch nuclear energy*. 10. Juni 2026.
<https://www.euronuclear.org/news/epz-2033-nuclear-strategy/>.
- Eurostat (2026): *Nuclear power production increased by 4.8% in 2024*. 29. Januar 2026. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20260129-2>.

- Gotev, Georgi (2026): „From phase-out to takeover: how Belgium is nationalising its nuclear power from ENGIE“. *EUalive*, 30. April 2026. <https://eualive.net/from-phase-out-to-takeover-how-belgium-is-nationalising-its-nuclear-power-from-engie/>.
- Group CEZ (2026): *Czech Nuclear Energy Strategy*. 2. Juni 2026. <https://www.cez.cz/nextcez/en/energy-generation/nuclear-power-plants/new-nuclear-power-sources/czech-energy-strategy>.
- International Atomic Energy Agency (2026a): *The database on nuclear power reactors*. 27. Mai 2026. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>.
- International Atomic Energy Agency (2026b): *Nuclear Technology Review 2025*. 2. Juni 2026. <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc69-inf9.pdf>.
- International Atomic Energy Agency (2026c): *IAEA mission finds Poland committed to safe management of radioactive waste and spent fuel, in line with plans for nuclear power development*. 1. März 2026. <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-mission-finds-poland-committed-to-safe-management-of-radioactive-waste-and-spent-fuel-in-line-with-plans-for-nuclear-power-development>.
- International Atomic Energy Agency (2026d): *Slovenia - country nuclear profile summary*. 10. Juni 2026. <https://cnpp.iaea.org/public/countries/SI/profile/highlights>.
- International Trade Administration (2025): *Romania nuclear energy a European catalyst for Small Modular Reactors*. 15. Mai 2025. <https://www.trade.gov/market-intelligence/romania-nuclear-energy-european-catalyst-small-modular-reactors>.
- Kiorri, Evi (2026): „Czechia: A small country with big nuclear energy ambitions“. *Euronews*, 30. April 2026. <https://www.euronews.com/my-europe/2026/04/30/czechia-a-small-country-with-big-nuclear-energy-ambitions>.
- Kraev, Kamen (2025): „Sweden proposes €19.9 billion framework to finance new nuclear plant projects“. *Nucnet*, 22. September 2025. <https://www.nucnet.org/news/sweden-proposes-eur19-9-billion-framework-to-finance-new-nuclear-plant-projects-9-1-2025>.
- Macalister, Terry (2006): „Uranium price soars as countries give nuclear power the go-ahead“. *The Guardian*, 28. Dezember 2006. <https://www.theguardian.com/business/2006/dec/27/4>.
- Ministry of Economic Affairs and Employment (2025): *Column: Paths to promote nuclear energy investments*. 31. Januar 2025. <https://tem.fi/en/-/column-paths-to-promote-nuclear-energy-investments>.

- Nuclear Energy Agency (2025): *Uranium 2024: Resources, production and demand*. Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. 31. Oktober 2026.
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_103179/uranium-2024-resources-production-and-demand?details=true.
- Orano (2026): *International expert in uranium processing*. 10. Juni 2026.
<https://www.orano.group/en/nuclear-expertise/from-exploration-to-recycling/international-expert-in-uranium-processing>.
- Patel, Sonal C. (2022): „China starts up first fourth-generation nuclear reactor“. *Power*, 1. Februar 2022.
<https://www.powermag.com/china-starts-up-first-fourth-generation-nuclear-reactor/>.
- Posiva (2026): *Repository in Onkalo*. 2. Juni 2026.
<https://www.posiva.fi/en/index/finaldisposal/researchandfinaldisposalfacilitiesatonkalo.html>.
- Rolls-Royce SMR (2026): *Clean, affordable energy for all*. 2. Juni 2026.
<https://www.rolls-royce-smr.com/>.
- Schmalz, Alexander (2026): „Belgien stoppt Atomausstieg: Regierung verhandelt über Kauf aller Reaktoren“. *Berliner Zeitung*, 30. April 2026. <https://www.berliner-zeitung.de/article/belgien-stoppt-atomausstieg-regierung-verhandelt-ueber-kauf-aller-reaktoren-10033716>.
- Statista (2026a): *Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Frankreich in den Jahren von 2023 bis 2025*. 2. Juni 2026.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182173/umfrage/struktur-der-bruttostromerzeugung-in-frankreich/>.
- Statista (2026b): *Nuclear reactor pipelines: Where projects are concentrated*. 24. April 2026. <https://www.statista.com/chart/36137/number-of-nuclear-reactors-under-construction-and-planned-by-country/>
- Stenger, Wif (2026): *Renewables surpass nuclear as Finland's biggest power source*. 22. Januar 2026. <https://yle.fi/a/74-20205942>.
- Sveriges Riksdag (2025): *Uranium mining to be allowed in Sweden*. 5. November 2025.
https://www.riksdagen.se/en/news/articles/2025/nov/5/uranium-mining-to-be-allowed-in-sweden_cmsdcec8317-69a0-4ebe-9299-d4f8b0ca00b8en/.
- Terrafame (2024): *Terrafame has started uranium recovery*. 18. Juni 2024.
<https://www.terrafame.com/newsroom/media-releases/terrafame-has-started-uranium-recovery.html>.

- The Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic (2024): *The Government has approved the update of the National Energy Plan. It lays emphasis on the development of nuclear energy and renewables*. 18. Dezember 2024. <https://mpo.gov.cz/en/guidepost/for-the-media/press-releases/the-government-has-approved-the-update-of-the-national-energy-plan-it-lays-emphasis-on-the-development-of-nuclear-energy-and-renewables--285287/>.
- The Renewable Energy Institute (2026): *Spain's renewable energy sector hits new milestones*. 2. Juni 2026. <https://www.renewableinstitute.org/spains-renewable-energy-sector-hits-new-milestones/>
- Thunder Said Energy (2024): *Uranium enrichment: by country, by company, by facility?* Mai 2024. <https://thundersaidenergy.com/downloads/uranium-enrichment-by-country-by-company-by-facility/>.
- Urenco (2026a): *Urenco Deutschland*. 10. Juni 2026. <https://www.urencocom/global-operations/urenco-deutschland>.
- Urenco (2026b): *Urenco Netherland*. 10. Juni 2026. <https://www.urencocom/new-about/global-locations/netherlands>.
- US Energy Information Administration (2026): *Nuclear explained*. 23. Mai 2026. <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/>.
- Vance, James David (2026): *White House Fact Sheet: Advancing the United States-Hungary bilateral partnership*. 8. April 2026. <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/white-house-fact-sheet-advancing-the-united-states-hungary-bilateral-partnership>.
- Vujasin, Mihajlo (2023): *Slovenia adopts new spatial strategy to pave way for nuclear reactors, SMRs*. Balkan Green Energy News, 5. Juli 2023. <https://balkangreenenergynews.com/slovenia-adopts-new-spatial-strategy-to-pave-way-for-nuclear-reactors-smrs/>.
- Wise Uranium (2024): *New uranium mining projects – Finland*. 18. Juni 2024. <https://www.wise-uranium.org/upfi.html>.
- World Mining Data (2026): *World Mining Data 2026. Federal Ministry Republic of Austria Finance*. Wien 2026. <https://wmd@bmf.gv.at>.
- World Nuclear Association (2025a): *Uranium Mining Overview*. 9. Dezember 2025. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview>.
- World Nuclear Association (2025b): *Russia - World nuclear performance report*. 31. August 2025. <https://world-nuclear.org/our->

- association/publications/world-nuclear-performance-report/russia-world-nuclear-performance-report.
- World Nuclear Association (2026a): *In-Situ Leach Mining of Uranium*. 20. Januar 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/in-situ-leach-mining-of-uranium>.
- World Nuclear Association (2026b): *World Uranium Mining Production*. 20. Januar 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production>.
- World Nuclear Association (2026c): *Mixed Oxide (MOX) Fuel*. 7. April 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox>.
- World Nuclear Association (2026d): *Nuclear Power in Slovakia*. 5. Mai 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/slovakia>.
- World Nuclear Association (2026e): *Nuclear power in the world today*. 10. Juni 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>.
- World Nuclear Association (2026f): *Nuclear power in Hungary*. 20. April 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/hungary>.
- World Nuclear Association (2026g): *Nuclear power in Bulgaria*. 17. Februar 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/bulgaria>.
- World Nuclear Association (2026h): *Nuclear power in Romania*. 17. Februar 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/romania>.
- World Nuclear Association (2026i): *Nuclear power in the Netherlands*. 10. Februar 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/netherlands>.
- World Nuclear Association (2026j): *Nuclear power in Estonia*. 16. Februar 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/estonia>.
- World Nuclear Association (2026k): *Nuclear power in the World today*. 10. Juni 2026: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>.
- World Nuclear Industry (2024): *A closer look at two operational Small Modular Reactor designs*. 11. März 2024.

- <https://www.worldnuclearreport.org/A-Closer-Look-at-Two-Operational-Small-Modular-Reactor-Designs>.
- World Nuclear News (2021): *Dual criticality for Chinese demonstration HTR-PM*. 12. November 2021. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Dual-criticality-for-Chinese-demonstration-HTR-PM>.
- World Nuclear News (2026a): *Von der Leyen: It was strategic mistake to turn against nuclear*. 10. März 2026. <https://world-nuclear-news.org/articles/von-der-leyen-it-was-strategic-mistake-to-turn-against-nuclear>.
- World Nuclear News (2026b): *China and Brazil among new signatories to tripling nuclear goal*. 10. März 2026. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/china-and-brazil-sign-up-to-tripling-nuclear-goal>.
- World Nuclear News (2026c): *Framatome signs VVER-440 fuel agreement with EU utilities*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/framatome-signs-vver-440-fuel-agreement-with-eu-utilities>.
- World Nuclear News (2026d): *Nuclear central in France's latest energy strategy*. 13. Februar 2026. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/nuclear-central-in-frances-latest-energy-strategy>.
- World Nuclear News (2026e): *Podcast: Will Spain rethink nuclear energy phase-out plan?* 6. Mai 2026. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/will-spain-rethink-nuclear-energy-phase-out-plan>.

Verzeichnis der Autorinnen und Autoren

Carlo Burkhardt (*1965) hat einen Ph.D. in Metallurgie und Werkstoffkunde von der Universität Birmingham, Großbritannien, und ist derzeit wissenschaftlicher Direktor am Institut für strategische Technologie und Edelmetalle, Professor für Fertigungstechnologien an der Hochschule Pforzheim in Baden-Württemberg und Professor für Werkstoffkunde an der Jožef-Stefan International Postgraduate School in Ljubljana, Slowenien. Er hat mehrere große, von der Europäischen Union finanzierte Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Recycling von Seltenerd-Permanentmagneten koordiniert bzw. koordiniert diese derzeit. Für seine Arbeiten zum Thema Recycling erhielt er unter anderem den Umwelttechnikpreis Baden-Württemberg und den deutschen Rohstoffeffizienzpreis 2017.

carlo.burkhardt@hs-pforzheim.de

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

reinhard.greiling@kit.edu

Sebastian Hasenstab-Riedel (*1975 / MLS) machte eine Ausbildung zum Chemielaboranten bei Siemens und Degussa in Hanau, welche er 1996 abschloss. Ab 1998 studierte er Chemie, zunächst an der Universität Siegen, und wechselte nach dem Vordiplom an die Universität Würzburg, wo er das Studium 2003 abschloss. Nach seiner Promotion in Theoretischer Chemie an der Universität Würzburg im Jahre 2006 folgten Postdoc-Aufenthalte an der Universität Helsinki und an der McMaster-Universität in Hamilton, Kanada. Er habilitierte sich 2013 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und folgte im selben Jahr dem Ruf auf eine W3-Professur an die Freie Universität Berlin. Im Jahre 2021 lehnte er einen Ruf an die Universität Münster ab und wurde im gleichen Jahr zum Einstein-Professor der Einstein Stiftung Berlin ernannt. Er war unter anderem im Vorstand der AG Fluorchemie und ist im Vorstand der Wöhler-Vereinigung für Anorganische Chemie der GDCh. Seit 2019 ist er Sprecher des Sonderforschungsbereichs „Fluor-Spezifische Wechselwirkungen“ (SFB1349) in Berlin. Er ist Gründungsdirektor des Centers for Sustainable Resources (CSR Berlin) welches 2025 an der FU Berlin gegründet wurde. Unter dem Dach des CSR|Berlin leitet er das WSS Ressourcen Projekt, welches mit 18 Mio. € von der Werner Siemens-Stiftung für 10 Jahre gefördert wird. Ziel ist es basierend auf reaktiv Ionischen Flüssigkeiten neue chemische Verfahren zu entwickeln, um die Transformation der Chemie zu neuen ressourcenschonenden und nachhaltigen Verfahren voranzutreiben. Seit 2026 ist Sebastian Hasenstab-Riedel Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

s.riedel@fu-berlin.de

Christoph Hilgers (*1968 / MLS) leitet den Lehrstuhl für Strukturgeologie und Tektonik und ist wissenschaftlicher Sprecher des Zentrums Klima & Umwelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seine Interessen sind Energiesysteme, Rohstoffeffizienz, Vorhersage von Reservoir-Qualitäten, transnationale Hochschulbildung sowie Prozess- und strategische Analysen. Nach dem Studium der Geologie an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) und der Angewandten Strukturgeologie & Gesteinsmechanik am Imperial College London arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent an der RWTH, von wo aus er an das Werkzeugmaschinenlabor (WZL), Qualitätsmanagement & Fertigungsmesstechnik wechselte. Dort entwickelte er die GÜtech als Teil der OES LLC, die er anschließend in Muskat, Oman, aufbaute und leitete. Vor seinem Ruf an das KIT war er Professor für

Reservoir-Petrologie an der RWTH. Er ist Mitglied verschiedener professioneller und interdisziplinärer Initiativen wie dem ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien, RohstoffWissen e.V., der wissenschaftlichen Gesellschaft für die Up- und Downstream Industrie DGMK e.V. und Vorsitzender des Berufsverbands Deutscher Geowissenschaften BDG e.V. Seit 2024 ist Christoph Hilgers Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

christoph.hilgers@kit.edu

Ernst-Peter Jeremias (*1953 / MLS) schloss 1972 eine Berufsausbildung mit Abitur bei VEB Bergmann-Borsig / Görlitzer Maschinenbau ab. Von 1972 bis 1976 studierte er Kraftwerksanlagen und Energieumwandlung an der Ingenieurhochschule Zittau. 1975 erlangte er den Abschluss als Hochschulingenieur, 1976 als Diplomingenieur. Von 1976 bis 1980 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und von 1980 bis 1991 als Gruppenleiter für Reaktorwärmetechnik im KKW Rheinsberg tätig. 1988 erfolgte die Promotion zum Dr.-Ing. an der Akademie der Wissenschaften der DDR, Kernforschungszentrum Rossendorf. Von 1991 bis 1994 war er Geschäftsführender Gesellschafter der entec Planungsgesellschaft GbR und von 1994 bis 2018 in der gleichen Funktion bei tetra ingenieure GmbH – Planungs- und Beratungsgesellschaft für Energie- & Umwelttechnik und Gebäude- & Versorgungstechnik tätig. Seit 2018 ist er Gesellschafter der tetra ingenieure GmbH und selbständiger Senior Consultant auf den Fachgebieten „Sektorenkopplung und Elektromobilität“ und „Einkommensenergien“. Seit 2020 ist er Freiberuflicher Dozent bei der Handwerkskammer Potsdam zum Themenkomplex „Elektromobilität und Infrastruktur“. Seit 2019 ist Ernst-Peter Jeremias Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

jer18dot@yahoo.com

Christina Labusch (*1988 / REMONDIS) vertritt als Leitung Public Affairs bei REMONDIS die politischen Interessen des Unternehmens in Berlin. Sie hat als Geschäftsführerin Public Affairs & Kommunikation die Public-Affairs-Abteilung des Verbandes „Die Papierindustrie“ aufgebaut, nachdem der Verband von Bonn nach Berlin gezogen ist. In verschiedenen Beratungsstationen hat sie Unternehmen aus Industrie und Energiewirtschaft beraten, politische Strategien konzipiert und umgesetzt. 2019 hat sie die agenturseitige Leitung der Kommunikation zur Shell Jugendstudie übernommen. Vor ihrer Tätigkeit in Berlin war sie

lange Jahre in Düsseldorf als Persönliche Referentin des Staatssekretärs im Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie und des Vizepräsidenten des Landtags Nordrhein-Westfalen tätig. Sie besitzt einen Master of Arts „Politikmanagement, Public Policy und öffentliche Verwaltung“ von der NRW School of Governance der Universität Duisburg-Essen.

christina.labusch@remondis.de

Norbert Mertzsch (*1950 / MLS) absolvierte eine Lehre als Elektromontageschlosser im Reichsbahnausbesserungswerk Potsdam. Von 1968 bis 1972 studierte er Chemie an der Technischen Hochschule für Chemie „Carl Schorlemmer“ in Merseburg und erlangte den Abschluss als Diplom-Chemiker. Von 1972 bis 1985 war er im VEB Stickstoffwerk Piesertitz tätig. Ab 1976 war er außerdem Fachchemiker für Analytik und Spektroskopie an der Karl-Marx-Universität Leipzig. 1984 erfolgte seine Promotion zum Dr. rer. nat. an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Von 1985 bis 2013 war er im Kernkraftwerk Rheinsberg tätig. In seinem danach folgenden Ruhestand war er bis 2019 Freier Mitarbeiter der Firma tetra ingenieure GmbH in Neuruppin. Seit 2018 ist Norbert Mertzsch Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin. Er war Mitglied und Vorsitzender des Vereins Brandenburgischer Ingenieure und Wirtschaftler (VBIW) sowie Leiter des Arbeitskreises Umweltschutz/Erneuerbare Energien (bis zur Auflösung des Vereins Ende 2022). Er ist Mitglied der Brandenburgischen Ingenieurkammer und der Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.

mertzsch@t-online.de

Wolfgang Methling (*1947 / MLS) ist Veterinärmediziner mit Schwerpunkt auf Tierhygiene, Tiergesundheit und umweltgerechter Landwirtschaft und ehemaliger Stellvertretender Ministerpräsident und Umweltminister des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern, Vizepräsident der Leibniz-Sozietät, Träger des Bundesverdienstkreuzes am Bande und Mitstreiter von *Horst Klinkmann* in der Kulturstiftung Rostock e.V. Seine Forschung begann in Leipzig, wo er sich mit Umweltfaktoren und tierischer Physiologie befasste. Die Habilitation zur mikrobiellen Belastung in Schweinezuchtställen prägte sein Profil an der Schnittstelle von Tierhaltung, Hygiene und Seuchenprävention. In Rostock erweiterte er dies um Umwelthygiene, Tierschutz und ökologischen Landbau. Mit über

hundert Publikationen und langjähriger wissenschaftsorganisatorischer Tätigkeit zählt er zu den prägenden Forschern einer veterinärmedizinischen Umweltorientierung.

w.methling@t-online.de

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

a.b.mueller@nhm.uio.no

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

jasemin.oelmez@kit.edu

Gerhard Pfaff (*1953 / MLS) studierte von 1973 bis 1978 Chemie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) und promovierte dort 1983 mit einer Arbeit im Bereich der Anorganischen Festkörperchemie. Anschlie-

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

pfaff.pigmente@gmx.de

Axel A. O. Wenke ist seit 2024 Direktor der Abteilung New Energy & Business Development bei Neptune Energy Innovations GmbH in Berlin, Salzwedel und Hannover. Der Hauptfokus der Neptune Energy Innovations GmbH ist die Entwicklung der Altmark Lithiumlagerstätte. Er ist ausgebildeter Geologe und hat an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg zur Thematik „Sedimentbeckenanalyse und Petroleumsysteme in Nordwestafrika“ promoviert. Seine berufliche Karriere begann er als Feld-, Wald- und Wiesengeologe im süddeutschen Raum. In den Jahren 2006 bis 2012 war er als Explorationsgeologe und Manager in der Geothermie in Deutschland tätig, überwiegend im Oberrheingraben. Von 2012 bis 2023 arbeitete er als Explorationsgeologe und Manager in Norwegen mit Fokus auf der Aufsuchung neuer Öl- und Gasfelder in der Barents See, der Norwegischen See/Europäisches Nordmeer und in der Nordsee sowie außerhalb Norwegens an den Kontinentalrändern des Südatlantiks.

axel.wenke@neptuneenergy.de

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

Entwicklungen im Bereich der kritischen und strategischen Rohstoffversorgung.

melike.yildirim@partner.kit.edu