

Markus Mezger, Oktober / November 2025

Metalle im technologischen Wandel

Die Welt steht vor großen Herausforderungen. Eine wachsende Weltbevölkerung muss bei begrenztem Ressourcenangebot umweltverträglich und nachhaltig versorgt werden. Das bisherige globale Wirtschaftsmodell hat neben diversen Umweltproblematiken eine anthropogene Klimaerwärmung hervorgebracht, der langfristig mit einer Restrukturierung des Energieangebots Einhalt geboten werden soll. Es werden verschiedene Lösungsansätze diskutiert, die aber neue Herausforderungen bringen. Eines der größten ungelösten Probleme ist die Frage, woher das Metallangebot kommen soll, das für die zukünftigen Technologien benötigt wird.



I. Zukunftstechnologien und Metalle

Metalle sind in vielen Zukunftsanwendungen ein unverzichtbarer Bestandteil. Ihre Verfügbarkeit ist essenziell für moderne Volkswirtschaften, sei es nun bei der Umstellung der Energiewirtschaft, bei künstlicher Intelligenz oder bei Zukunftstrends in der Industrie. Aus diesem Grund haben zahlreiche Staaten Verzeichnisse erstellt, in denen sie die Metalle benennen, die sie als kritisch für ihre ökonomische und militärische Sicherheit einstufen. Tabelle 1 vermittelt einen Überblick, welche Metalle das sind und für welche Zukunftstechnologien sie gebraucht werden.

Energie sektor

Der größte technologische Wandel wird vom Energie sektor gefordert werden. Es ist weitgehend unstrittig, dass die Verbrennung von fossilen Brennstoffen für die Beheizung von Gebäuden, für den Energiebedarf der Industrie und im Verkehrswesen eine Klimaerwärmung hervorgerufen hat, die mit natürlichen Faktoren praktisch nicht erklärt werden kann. Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, sollen fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Dabei stehen die Energiemärkte vor der Herausforderung, eine vor allem in den Schwellenländern wachsende Energienachfrage bei einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien zu befriedigen.

Bei den erneuerbaren Energien kommen unterschiedliche Metalle zum Einsatz. Bei Windkraftanlagen wird die mechanische Energie des Rotors in elektrische Energie umgewandelt. Im Generator einer Windkraftanlage liegt am Rotor ein Magnetfeld an, dessen Rotation nach dem Prinzip der Lorentzkraft einen elektrischen Stromfluss induziert. Dabei werden Kupferspulen als Leiter und Metalle mit permanentmagnetischen Eigenschaften verwendet. Dies sind die Seltenen Erden Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium. Neue Windkraftanlagen müssen durch den Ausbau der Stromnetze in die Infrastruktur eingebunden werden. Aufgrund der unterschiedlichen Standorte von Windkraftanlagen und Stromverbrauchern muss der Strom teilweise über große Entfernung in Übertragungsnetzen transportiert werden. Diese werden mit Hochspannungsleitungen aus Kupfer betrieben. Bei der Verteilung des Stroms zum Endkunden werden heute noch Oberleitungen aus Aluminiumsträngen verwendet. Der Trend geht aber auch hier zu unterirdisch verlegten Kupferkabeln.

Die zweite große Quelle erneuerbarer Energien sind Photovoltaikanlagen. Die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie geschieht in Standard-Photovoltaikzellen aus Silizium, die in einen Aluminiumrahmen eingefasst und durch Leitbahnen aus Silber verbunden sind. Der Anschluss an das Stromnetz wird u. a. mit Kupfer gewährleistet. Zunehmende Bedeutung gewinnen Dünnschicht-Photovoltaikzellen, die leichter und flexibler sind, aber einen geringeren Wirkungsgrad aufweisen. Bei Dünnschicht-Photovoltaik werden hauchdünne Schichten von Kupfer, Indium, Gallium, Selen, Kadmium und Tellur auf ein Trägersubstrat aus Glas oder Kunststoff aufgedampft.

Tabelle 1: Kritische Minerale und ihre technologischen Anwendungen

Kritisches Mineral	On US list	On EU list	On India list	On Japan list	On UK list	Anwendungen
Antimon	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Flammschutzmittel, Blei-Säure-Batterien
Arsen	Yes	Yes	No	No	No	Holzschutzmittel, Pestizide, Halbleiter
Beryllium	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Luft & Raumfahrt, Medizintechnik, Kernreaktoren, Legierungen
Bismuth	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Legierungen, Halbleiter, Kondensatoren
Chrom	Yes	No	No	Yes	No	Edelstahl, Oberflächenbeschichtungen, Legierungen
Kobalt	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Batterien, Superlegierungen, synthetische Kraftstoffe
Gallium	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Halbleiterindustrie, LED, Laserdioden, Solarzellen
Germanium	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Glasfaserkabel, Transistoren, Katalysatoren, Lasersysteme
Graphite	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Batterien, Feuerfeste Werkstoffe
Hafnium	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Luft & Raumfahrt, Katalysatoren, Legierungen, Nukleartechnik
Indium	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Touchscreens & Displaytechnik, Kernreaktoren, Solarzellen
Lithium	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Batterien
Magnesium	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Metallurgie (Reduktionsmittel, Entschwefelung), Legierungen
Mangan	Yes	Yes	No	Yes	No	Batterien, Legierungen
Molybdän	No	No	Yes	Yes	No	Stahllegierungen, Luft & Raumfahrttechnik
Nickel	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Batterien, Edelstahl- & andere Legierungen, Katalysatoren
Niob	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Stahllegierungen, Medizintechnik, Luft & Raumfahrt
Platinmetalle u.a. Palladium, Platin, Rhodium, Iridium, Ruthenium	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Katalysatoren, Brennstoffzellen, Festplattenspeicher
Seltene Erden u.a. Neodyn, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Yttrium, Lanthan, Samarium, Gadolinium, Europium, Cerium	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Hochleistungsmagneten (u. a. Windkraftanlagen, Elektromotoren), Lasertechnik (u. a. automatisiertes Fahren, militärische Anwendungen), Kernreaktoren, Festplattenspeicher, Halbleiter, Feststoffbatterien, Katalysatoren, Medizintechnik
Rhenium	No	No	Yes	Yes	No	Superlegierungen Luft & Raumfahrt, Katalysatoren
Scandium	Yes	Yes	No	Yes	No	Brennstoffzellen, Elektrolyse, Legierungen Leichtbau
Selenium	No	No	Yes	Yes	No	Halbleiterindustrie, Solarzellen, Legierungen
Silicon	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Halbleiterindustrie, Beschichtungen, Medizintechnik
Tantal	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Kondensatoren, Superlegierungen, Beschichtungen
Tellur	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Solarzellen, Legierungen, Halbleiterindustrie
Titan	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Legierungen Leichtbau, Meerwasserentsalzung
Tungsten	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Hartmetallwerkzeuge, Stahl & Superlegierungen
Vanadium	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Redox-Flow-Speicher, CO ₂ -Speicherung (CCS)
Zirkonium	Yes	No	Yes	Yes	No	Legierungen, Nuklearindustrie, Elektrolyse

Quelle: Australian Government Critical Minerals Office¹, Micro Meets Macro Investment

Eines der größten ungelösten Probleme der Energiewende sind die saisonalen Schwankungen der Energienachfrage. Im Sommer ist das Energieangebot aus erneuerbaren Energien aufgrund der längeren Sonnenscheindauer höher, während die Energienachfrage aufgrund des geringeren Heizbedarfs niedriger ist. Im Winter ist es genau umgekehrt. Dieses Problem könnte erstens dadurch gelöst werden, dass die Kapazität der erneuerbaren Energien so stark ausgebaut wird, dass sie den Bedarf des Winters abdeckt und im Sommer teilweise ungenutzt bleibt. Dabei gibt es jedoch das Problem, dass die gesicherte Leistung, also das Energieangebot, das zu jedem beliebigen Zeitpunkt sicher abgerufen werden kann, bei den erneuerbaren Energien nur einen geringen Teil der maximalen Kapazität der installierten Leistung ausmacht. Dieses Problem könnte durch die Bereitstellung von sehr großen Ersatzkapazitäten, die im Notfall kurzfristig einspringen könnten (vor allem Gaskraftwerke), gelöst werden, was aber irgendwann an ökonomische Grenzen stößt.

¹ [Australia's Critical Minerals List and Strategic Materials List | Department of Industry Science and Resources](#)

Der zweite Lösungsansatz, die saisonalen Schwankungen der Energienachfrage zu überbrücken, besteht darin, einen Speicher für elektrische Energie zu finden. Der Klassiker sind Pumpspeicherwerke, die Wasser den Berg hochpumpen und die geschaffene Lageenergie bei Bedarf wieder abrufen. Auch Batteriespeicherwerke werden zunehmend gebaut. Die Speicherkapazität reicht aber nach heutigem Stand nur für einen kurzzeitigen Energieausgleich von wenigen Stunden bis Tagen aus. Ein möglicher Energiespeicher, der größere saisonale Zeiträume und einen großen Leistungsbedarf überbrücken könnte, ist Wasserstoff. Dieser wird durch die Elektrolyse von Wasser gewonnen. Nach heutigem Kenntnisstand ist Wasserstoff noch ein wenig effizienterer Energiespeicher. Nur ca. ein Drittel der Energie, die für seine Erzeugung notwendig war, kann bei seiner Verbrennung wieder abgerufen werden. Dennoch wird man an Wasserstoff bei einer ernsthaften Verfolgung der Klimaziele vermutlich nicht umhinkommen. Der Effizienzgrad dürfte sich durch technologischen Fortschritt noch deutlich erhöhen.

Bei der Wasserstofferzeugung werden je nach Verfahren verschiedene Metalle gebraucht. Die alkalische Elektrolyse verwendet vor allem Nickel. Bei der Polymerelektromembran-Elektrolyse werden derzeit noch die Edelmetalle Iridium, Ruthenium und Platin eingesetzt. Die Festkörperperoxid-Elektrolyse hat einen Bedarf an Seltenen Erden wie Yttrium, Lanthan, Zirkonium und Scandium. Die Verbrennung von Wasserstoff findet üblicherweise in Brennstoffzellen mit einer Polymermembran als Elektrolyt statt. Die Elektroden enthalten Platin, Ruthenium, Kobalt und Nickel. Die Feststoffoxid-Brennstoffzelle kann bei höheren Temperaturen betrieben werden und besitzt einen festen Elektrolyten. Gefragt sind hier u. a. wieder die Seltenen Erden Scandium, Yttrium, Lanthan und Zirkonium. Daneben können auch Chrom, Aluminium, Mangan und Nickel Bestandteile der Festkörperperoxid-Brennstoffzelle sein.

Um ehrgeizige Klimaziele zu erreichen, werden auch neue Technologien verwendet werden, die Kohlenstoffdioxid (CO₂) direkt aus der Luft entziehen (Direct Air Capture) oder unmittelbar vor oder nach der Verbrennung von fossilen Brennstoffen absondern, abtransportieren und anschließend unterirdisch einlagern (Carbon Capture Storage). Die Legierungselemente für den verwendeten Stahl bestehen aus Mangan, Nickel, Chrom und Vanadium.

Verkehrswesen

Im Verkehrswesen ist das zentrale Thema die Umstellung von Verbrennungsmotoren auf Elektroantrieb. Die Elektromotoren basieren ähnlich wie Windkraftanlagen auf der Lorentzkraft. Das am Rotor anliegende Magnetfeld wird durch Kupferspulen induziert oder durch Permanentmagneten erzeugt. In einem Elektrofahrzeug wird dadurch etwa dreimal so viel Kupfer verbaut wie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Als Permanentmagnete sind wie bei Windkraftanlagen die Seltenen Erden Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium gefragt. Die Energie wird bei Elektrofahrzeugen aus Batterien abgerufen, bei denen

an der Kathode vor allem Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan und an der Anode Graphit und Lithium benötigt werden. Ein Zukunftstrend bei der Mobilität ist das autonome Fahren. Die eingesetzten Lasersysteme verwenden die Seltenen Erden Yttrium und Neodym sowie das Industriemetall Aluminium. Einbrisantes Thema ist der Einsatz von Seltenen Erden in Militärtechnologien. Die Metalle mit magnetischen Eigenschaften Neodym, Praseodym, Terbium, Dysprosium und Samarium sowie Yttrium für Laseranwendungen sind in der Raketensteuerung von Militärflugzeugen, Schiffen und U-Booten derzeit unverzichtbar.

Künstliche Intelligenz und Elektronik

In aller Munde ist aktuell der Boom bei künstlicher Intelligenz. Die entsprechenden Anwendungen benötigen zum Training sehr große Datenmengen, die in Rechenzentren gespeichert sind. Im Gebrauch sind neben Magnetbändern vor allem HDD-Festplatten, bei denen der Datenzugriff etwas langsamer als bei SSD-Festplatten ist, die aber dafür kostengünstiger sind. Bei HDD-Festplatten werden Daten auf einer dünnen magnetischen Schicht gespeichert, die aus den Metallen Kobalt und Chrom, aber auch den teuren Edelmetallen Platin und Ruthenium besteht. Der Schreib- und Lesevorgang wird durch einen Magneten gewährleistet, der wiederum Neodym enthält. Die schnelleren SSD-Festplatten benötigen vor allem Silizium und Tantal. Die Daten müssen aber nicht nur gespeichert, sondern schnell in alle Welt verteilt werden. Der Datenverkehr wird zu einem großen Teil über Glasfaserkabel laufen. Für das Brechungsprofil der Lichtwellen wird vor allem Germanium gebraucht.

Metalle spielen auch eine große Rolle bei elektronischen Geräten. Erwähnenswert ist der Einsatz von Indium für Touchscreens und Europium bei der Farbverstärkung von elektronischen Displays u. a. bei Smartphones. In diesen kommen eine ganze Reihe weiterer Metalle zum Einsatz: Lanthan in der Platine, Gadolinum im Display sowie Terbium für die Smartphone-Vibration.

II. Entwicklungsszenarien und der zukünftige Metallbedarf

Eine Abschätzung des zukünftigen Metallbedarfs setzt Annahmen über Bevölkerungsentwicklung, die internationale Zusammenarbeit und die Geschwindigkeit der Energiewende voraus. Im Wesentlichen gibt es zwei Institutionen, die mit unterschiedlichen Entwicklungsszenarien arbeiten: Den Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change = IPCC) und die Internationale Energieagentur (IEA). Der Weltklimarat hat in seinen

Sachstandsberichten² 5 mögliche Entwicklungspfade (Shared Socioeconomic Pathways = SSPs) bis zum Jahr 2100 vorgestellt.

Der erste Entwicklungspfad, vom Weltklimarat mit dem Wort „Nachhaltigkeit“ getauft (SSP1), ist im Hinblick auf die Begrenzung der CO₂-Emissionen der optimistischste. Er sieht eine wachsende internationale Zusammenarbeit und ressourcenschonende Wirtschaftsmodelle voraus. Für die Metalle impliziert das hohe Nachfragezuwächse, da alternative Technologien und Energiemodelle in stärkerem Maße entwickelt werden. Der zweite Entwicklungspfad (SSP2) stellt einen Mittelweg dar. Die ungleiche Entwicklung verschiedener Wirtschaftsregionen setzt sich fort. Internationale Institutionen machen nur geringe Fortschritte bei der Erreichung gemeinsamer Entwicklungsziele. Im Prinzip beschreibt dieser Pfad die Fortschreibung des gegenwärtigen Zustands. Der dritte Pfad (SSP3) ist durch die Durchsetzung nationaler Interessen charakterisiert. Er sieht in den Industrieländern ein geringes Bevölkerungswachstum und in den Entwicklungsländern eine materialintensive Wirtschaftsweise und Umweltzerstörung vor. Im vierten Entwicklungspfad (SSP4), vom Weltklimarat mit Ungleichheit bezeichnet, vertieft sich die Kluft zwischen reichen und armen Ländern. Der technologische Fortschritt in der Hightech-Wirtschaft ist hoch. Dieses Entwicklungsszenario ist durch zunehmende soziale Unruhen und geopolitische Konflikte geprägt. Im fünften Entwicklungspfad (SSP5), der beim Weltklimarat unter dem Label „Fossiler Pfad“ läuft, erfährt die Verbrennung von fossilen Brennstoffen keine große Einschränkung. In vielen Volkswirtschaften wird ein Lebensstil gepflegt, der in hohem Maße Rohstoffe und Energieressourcen beansprucht. Der Fokus liegt auf einem hohen Wirtschaftswachstum und einer starken Globalisierung vieler Marktsegmente.

Die Deutsche Rohstoffagentur (DERA), ein Institut der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, hat in einer groß angelegten Studie³ den zukünftigen Metallbedarf von Zukunftstechnologien bis zum Jahr 2040 abgeschätzt. Herausgegriffen wurden dabei drei Szenarien des Weltklimarats: Nachhaltigkeit (SSP1), Mittelweg (SSP2) und fossiler Pfad (SSP5). Abgeschätzt wurde der Mehrbedarf nach ausgewählten Metallen durch Zukunftstechnologien in Relation zur Metallproduktion des Jahres 2018. Die Ergebnisse sind zum Teil schockierend. Im nachhaltigen Szenario betragen die Nachfragezuwächse teilweise mehr als das Fünffache der 2018er-Produktion. Vor allem die Batteriemetalle *Lithium, Kobalt* und *Graphit* sowie die Seltenen Erden mit permanentmagnetischen Eigenschaften (*Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym*) mit ihren vielfältigen Anwendungen bei der

² Die Sachstandsberichte des Weltklimarats können u. a. über den folgenden Link abgerufen werden:
<https://www.de-ipcc.de/306.php>

³ DERA Rohstoffinformationen 50 (2001): Rohstoffe für Zukunftstechnologien: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Stromerzeugung sollen starke Nachfragezuwächse erfahren. Da dieses Szenario die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft beinhaltet, rechnete die Deutsche Rohstoffagentur auch bei *Iridium* (Elektrolyse) und *Scandium* (Brennstoffzelle) mit einer Verfünffachung bzw. Verachtfachung der Nachfrage in Relation zur Produktion des Jahres 2018.

Ähnlich herausfordernd stellt sich der als Mittelweg (SSP2) beschriebene Entwicklungspfad dar. Lediglich im fossilen Szenario (SSP5) sollen die Nachfragezuwächse bei den Batteriemetallen weniger gravierend sein. Da dieses Szenario hohe Investitionen in Rechenzentren unterstellt, wurden hohe Nachfragezuwächse bei den Festplattenmetallen *Platin* und *Ruthenium* prognostiziert. Für *Germanium* (Glasfaserkabel) und *Tantal* (Kondensatoren, Legierungen) sind laut DERA in allen drei Szenarien starke Nachfragezuwächse zu erwarten.

Tabelle 2: Nachfragezuwächse durch Zukunftstechnologie bis zum Jahr 2040 in Relation zur Produktion des Jahres 2018

Rohstoff	Nachfragezuwächse bis 2040 durch Zukunftstechnologien in Relation zur Produktion des Jahres 2018		
Szenarien	Nachhaltigkeit SSP1	Mittelweg SSP2	Fossiler Pfad SSP3
Kupfer	22,92%	29,58%	38,33%
Lithium	589,47%	400,00%	89,47%
Kobalt	376,92%	276,92%	123,08%
Tantal	144,44%	138,89%	211,11%
Titan	65,00%	55,00%	70,00%
Platin	34,74%	121,05%	426,32%
Iridium	500,00%	294,12%	29,41%
Ruthenium	242,42%	606,06%	1909,09%
Germanium	171,43%	178,57%	200,00%
Graphit	83,33%	74,17%	16,67%
Vanadium	70,33%	75,82%	67,03%
Gallium	21,46%	19,27%	22,44%
Rhenium	56,00%	52,00%	72,00%
Indium	51,85%	41,98%	40,74%
HSE (Dysprosium/Terbium)	538,46%	676,92%	623,08%
LSE (Neodym/Praeseodym)	225,81%	203,23%	222,58%
Scandium	791,21%	373,63%	65,93%
Lanthan	108,33%	30,56%	3,33%
Yttrium	60,53%	30,26%	21,05%

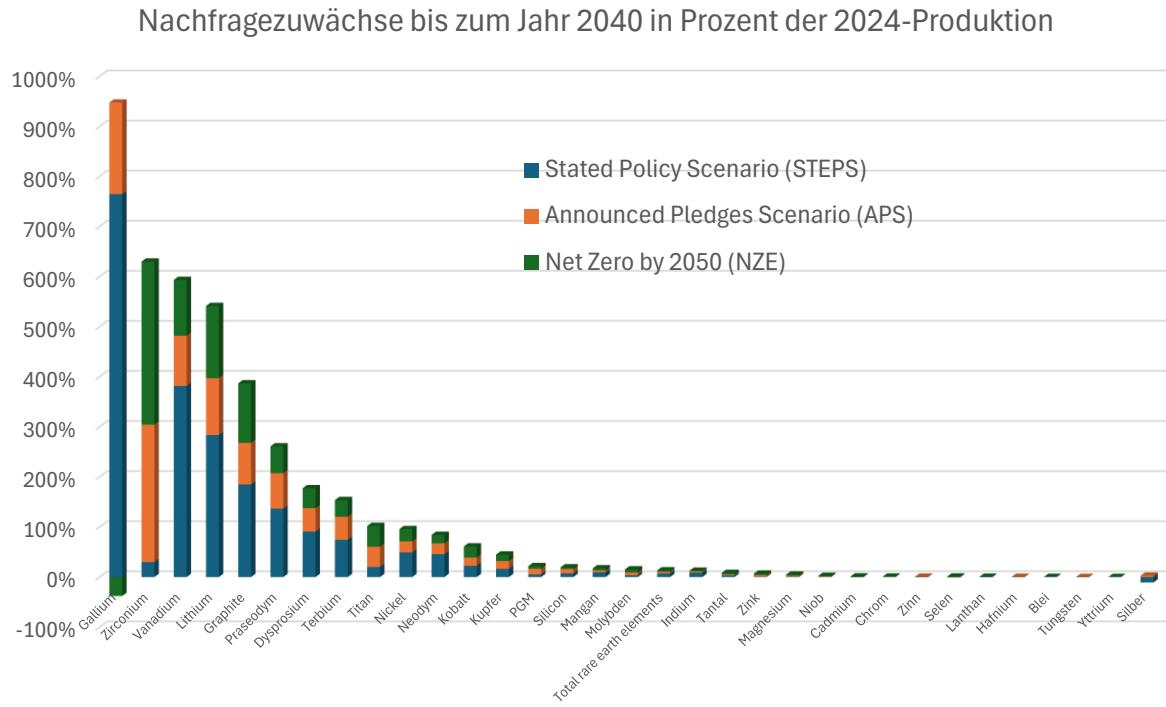
Quelle: DERA, Berechnungen Micro Meets Macro Investment

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen wie die Deutsche Rohstoffagentur kommt die Internationale Energieagentur (IEA). Die IEA schätzt für eine größere Anzahl von Metallen den Effekt auf die Nachfrage ab, der sich allein durch die Wende im Energiesektor und im Verkehrswesen ergibt. Die Ergebnisse fallen deswegen insbesondere bei den Platinmetallen unterschiedlich aus. Auch die IEA rechnet mit unterschiedlichen Entwicklungsszenarien bis zum Jahr 2050. Das konservativste Szenario ist das Stated Policy Scenario (STEPS), das unterstellt, dass zu den bereits implementierten Klimaschutzmaßnahmen keine weiteren hinzukommen. Die nationalen und internationalen CO₂- und Klimaziele werden in diesem Szenario deutlich verfehlt. Das Announced Pledges Scenario (APS) geht davon aus, dass angekündigte politische Maßnahmen zur Erreichung von Klimazielen, z. B. die nationalen Versprechungen im Rahmen des Pariser Klimaabkommens, auch tatsächlich umgesetzt werden. Auch in diesem Szenario werden die Ziele von Nullemissionen im Jahr 2050 und die Begrenzung der Erderwärmung auf 2 Grad mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht werden. Deswegen schlägt das normative Net Zero Scenario bis 2050 (NZE) vor, was getan werden müsste, um diese Ziele umzusetzen. Ausgewertet werden die sechs Technologien Solartechnik, Windkraftwerke, Wasserstofferzeugung und -verbrauch, Elektrofahrzeuge, Batteriespeicher und Elektrizitätsinfrastruktur. Es werden Schätzungen für die Jahre 2030, 2035, 2040, 2045 und 2050 abgegeben.⁴ Die Nachfrage nach einzelnen Metallen aus den angeführten Technologien explodiert gemäß der IEA regelrecht. Den Vogel schießen *Vanadium* und *Gallium* ab, deren Nachfrage sich aufgrund ihrer Verwendung bei Batterien bzw. Solarzellen mehr als vertausend- bzw. verdreihundertfachen soll. Allerdings ist das Ausgangsniveau der Nachfrage aus grünen Technologien in diesen beiden Metallen auch sehr gering. Es bietet sich an, die prognostizierten Nachfragesteigerungen wie oben wieder in Relation zur aktuellen Produktion zu setzen. Die Schätzungen für die globalen Produktionsdaten für das Jahr 2024 wurden zum größten Teil der jährlichen Publikation des United States Mineral Survey (USGS) entnommen.⁵

⁴ Vgl. International Energy Agency: Global Critical Minerals Outlook 2025 (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ef5e9b70-3374-4caa-ba9d-19c72253bfc4/GlobalCriticalMineralsOutlook2025.pdf>). Die Daten zur Studie sind unter dem Link <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/critical-minerals-dataset> abrufbar.

⁵ Vgl. U. S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries 2025 (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>). Die Daten sind unter dem folgenden Link abrufbar: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/6798fd34d34ea8c18376e8ee>. Der USGS veröffentlicht keine globalen Produktionsdaten zu den einzelnen Seltenen Erden. Die globalen Produktionsdaten beziehen sich hier auf die Jahre 2021 und 2022 und wurden anderen Quellen entnommen.

Schaubild 1: Prognostizierte Nachfragezuwächse nach Szenarien bis zum Jahr 2040



Quelle: IEA, USGS, Berechnungen Micro Meets Macro Investment

Die Schätzungen der IEA sind ähnlich brisant wie die der Deutschen Rohstoffagentur. Das Angebot von *Gallium*, *Zirconium/Hafnium* und *Vanadium* muss sich verfünfachen, um die stürmisch wachsende Nachfrage aus grünen Technologien zu bedienen. Kritisch sind auch die hohen Nachfragezuwächse der Batterimetalle *Lithium*, *Graphit*, *Kobalt* und *Nickel*, da diese heute schon einen hohen Nachfrageanteil grüner Technologien haben. Das ist bei den Seltenen Erden mit permanentmagnetischen Eigenschaften *Neodym*, *Praseodym*, *Dysprosium* und *Terbium* anders. Aber auch hier sind die Nachfragezuwächse so groß, dass sich die Produktion teilweise verdoppeln muss, um den Bedarf abzufangen. Die IEA rechnet deswegen teilweise auch mit Alternativszenarien, falls der Ausbau grüner Technologien an der fehlenden Verfügbarkeit Seltener Erden scheitern sollte.

Da der technologische Wandel laufend im Fluss ist und es große Bestrebungen geben wird, vor allem die teuren Edelmetalle zu substituieren, ist langfristigen Prognosen mit einer gesunden Portion Skepsis zu begegnen. Ein Beispiel für Substitution liefern auch die Datensätze der IEA. So soll die Verwendung von Silber bei Solarzellen in allen Nachfrageszenarien durch technischen Fortschritt bzw. kostengünstigere Alternativen zurückgehen.

III. Die langsame Reaktion des Metallangebots

Das Rohstoffangebot reagiert teilweise sehr langsam auf strukturelle Verschiebungen der Nachfragekurven. Der erste Grund ist die teilweise extrem langwierige Entwicklung von Produktionslagerstätten. Ein Erzkörper muss zunächst einmal entdeckt sein, bevor durch langjährige Exploration die Reserven und Ressourcen dieses Erzkörpers hinreichend definiert werden können. Anschließend muss in Pre-Feasibility- bzw. Feasibility-Studien die wirtschaftliche Abbaufähigkeit nachgewiesen werden. Ein Mining-Plan mit ökonomischen Parametern wie z. B. Produktionsverfahren, Cut-Off-Grades, jährlichen Produktionsmengen, Lebensdauer des Mining-Projekts muss aufgestellt werden. Die notwendigen Abbaulizenzen müssen eingeholt, Umweltauflagen erfüllt werden. Rechte und Interessen indigener Gruppen müssen beachtet werden. Politische und wirtschaftliche Interessen müssen mit den Regierungen der jeweiligen Länder ausverhandelt sein. Die Infrastruktur (Energieversorgung, Transport der Erze) muss in einzelnen Regionen teilweise erst noch entwickelt werden. Anlagen und Unterkünfte für Mitarbeiter müssen gebaut werden. Die Finanzierung der Projekte muss auch in schwierigen Kapitalmarktphasen gesichert sein. Und selbst, wenn das alles gelungen ist, können die ersten Produktionsergebnisse den Mining-Plan in einer Weise konterkarieren, dass dieser nur noch Makulatur ist.

Nach dieser Vorrede wird verständlich geworden sein, warum vom Auffinden bis zur Produktion bei neuen Mining-Projekten heute durchschnittlich mehr als 15 Jahre vergehen. Beim Abbau von Metallen sind die Erzgehalte oft sehr gering. Riesige Erdmassen müssen bewegt und entsorgt werden. Die Lösung der Metallgehalte aus dem Gestein geschieht oft mit giftigen Chemikalien. Aber mit dem gewonnenen Erzkonzentrat ist die Arbeit noch nicht getan. Es müssen zusätzlich noch Raffinade-Kapazitäten, die einen hohen Energiebedarf haben, aufgebaut werden, um aus dem Erzkonzentrat das in der Industrie verwendbare Metall zu gewinnen.

Kein Wunder also, dass angesichts dieser Umstände Mining und Raffination immer mehr nach China abgewandert sind. Das Land der Mitte hat bei vielen Metallen Produktionskapazitäten systematisch aufgebaut und ist bei vielen Metallen sowohl der größte Produzent als auch der größte Konsument. Bei den klassischen Märkten für große Industriemetalle wie Kupfer, Aluminium, Nickel oder Zink hat China einen Marktanteil von rund einem Drittel, bei den Seltenen Erden sind es rund 90 %. Das bringt neue Probleme mit sich. Zum einen ist die Transparenz in diesen Märkten nicht gerade groß, zum anderen birgt die hohe Angebotskonzentration politische Risiken (s. u.).

Wenn bei einem schnellen Nachfrageanstieg, z. B. in einem Konjunkturaufschwung, das Angebot aus den genannten Gründen kurzfristig nicht ausgeweitet werden kann, sorgen oft schnelle, teilweise extreme Preisanstiege für das notwendige Crowding-Out der Nachfrage. Diese Squeezes der Metallpreise dauern typischerweise nur einige

Monate. Bekannte Beispiele sind der Anstieg des Palladiumpreises von 200 auf 1000 USD je Unze im Jahr 1999 und 2000, der Anstieg des Nickelpreises von 10.000 USD je Tonne auf mehr als 50.000 USD im Jahr 2006/07 oder abermals der explosionsartige Anstieg des Nickelpreises von 20.000 USD auf rund 100.000 USD je Tonne infolge des russischen Überfalls auf die Ukraine im Jahr 2022.

Um eine langfristige Angebotsreaktion zu incentivieren, müssen die Preise aber über einen längeren Zeitraum über bestimmten Schwellenpreisen liegen. Entscheidend sind die marginalen Grenzkosten unrealisierter Minenprojekte. Projekte mit hohen Erzgehalten und vergleichsweise niedrigen Kosten befinden sich häufig schon in Produktion. Die Kostenkurve verläuft für neue Projekte oft sehr steil, so dass die Metallpreise ein dauerhaft höheres Plateau erreichen müssen, um dieses Angebot anzustoßen.

Bei den hinsichtlich der Marktgröße kleineren Metallen kommt hinzu, dass sie in der Produktion häufig nur Beiprodukte sind, die im Vergleich zum Hauptmetall nur in geringen Mengen gefördert. Typische Beispiele sind *Germanium* und *Cadmium* als Beiproduct der Zinkproduktion. *Molybden*, *Selen* und *Tellur* werden oft mit *Kupfer* abgebaut. Die Seltenen Erden werden oft als Beiproduct von Kohle, Uran und Eisenerz gewonnen. Wenn es beim Hauptrohstoff keine Knaptheiten und positiven Preissignale gibt, dann wird auch ein starker Preisauftrieb bei den Metall-Beiprodukten keine Ausweitung der Produktion auslösen, da viele große Bergbaukonzerne nur einen kleinen Teil ihres Umsatzes mit diesen Metallen erzielen.

Das Sekundärangebot aus dem Recycling wird bei vielen Metallen zwar deutlich zunehmen. Eine generelle Lösung der Angebotsproblematik wird dadurch aber nicht gelingen, da die Trennung und Wiederverwertung von Metallen energie- und kostenintensiv ist. Der Trend geht bei elektronischen Geräten zu einer Wiederaufbereitung, statt der Loslösung und dem Recycling der darin verbauten Metalle.

IV. Strukturelle Angebotsdefizite und Angebotsrisiken bei den Schlüsselmetallen

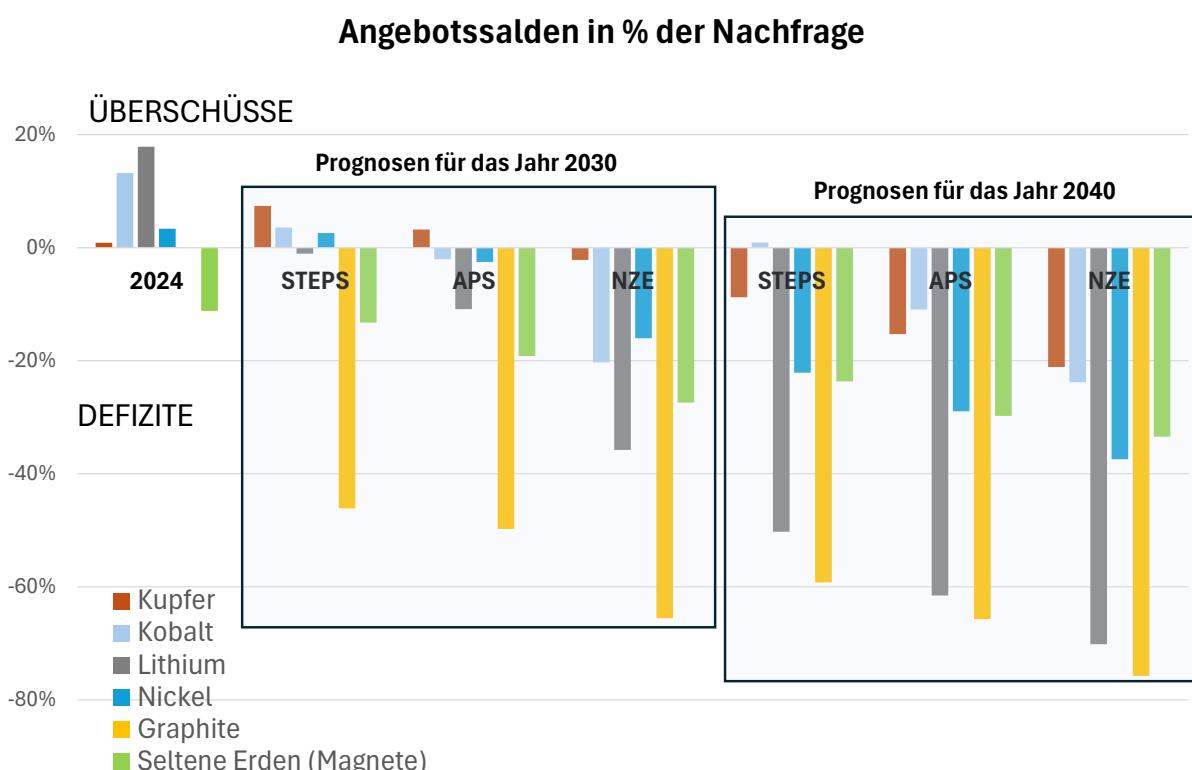
Langfristige Angebotsprognosen bis in das Jahr 2040 sind aufgrund der vielen Imponderabilien (Preisentwicklung, politische Initiativen, Nachfrageszenarien) selten. Die Internationale Energieagentur veröffentlicht für die Jahre 2030, 2035 und 2040 Angebotsprognosen für die Schlüsselmetalle der Energiewende. Das sind der Allesköninger *Kupfer*, die Batteriemetalle *Lithium*, *Kobalt*, *Graphit* und *Nickel* sowie die Seltenen Erden mit magnetischen Eigenschaften *Neodym*, *Praseodym*, *Dysprosium* und *Terbium*. Zusammen mit den Nachfrageschätzungen lassen sich geschätzte Marktsalden errechnen.

Im Jahr 2024 herrschte laut IEA noch eine vergleichsweise entspannte Situation vor. *Kupfer* verzeichnete einen geringen, die Batteriemetalle einen mehr oder weniger großen Angebotsüberschuss. Das wird sich aber bis zum Jahr 2030 wahrscheinlich

ändern. Lediglich im konservativen Stated Policy Scenario (STEPS) sind bei Kupfer, Kobalt und Nickel noch leichte Angebotsüberschüsse zu erwarten. Dabei unterstellt die IEA, dass das raffinierte Kupferangebot bis zum Jahr 2030 um 25 % steigt. Mögliche Marktüberschüsse verschwinden dann aber ab dem Jahr 2030 selbst im STEPS-Szenario. Bis zum Jahr 2040 sollen alle Schlüsselmetalle Angebotsdefizite ausweisen.

Kritisch ist laut IEA die Situation bei *Graphit* und bei den Seltenen Erden mit magnetischen Eigenschaften, die bereits heute im Defizit sind. Unabhängig vom Nachfrageszenario werden sich diese strukturellen Angebotsdefizite zukünftig noch ausweiten. In dem Szenario von null CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 (NZE) wären die Angebotsdefizite bereits im Jahr 2030 so groß, dass die Umsetzung einer derartigen Umweltpolitik durchaus an der fehlenden Verfügbarkeit von Schlüsselmetallen scheitern könnte.

Schaubild 2: Prognostizierte Marketsalden für Schlüsselmetalle der Energiewende nach Entwicklungsszenarien für die Jahre 2030 und 2040



Quelle: Internationale Energieagentur, Micro Meets Macro Investment

Eine der Grundproblematiken der Metallmärkte ist die hohe Konzentration des Angebots auf einzelne Länder. Die Seltenen Erden und *Graphit* werden zu mehr als 60 % in China gefördert. Das raffinierte Angebot kommt zu mehr als 90 % aus dem Land der Mitte. Bei *Nickel* kommt mehr als die Hälfte des Erzangebots aus Indonesien, bei *Kobalt* ist es die Republik Kongo. Die *Platinmetalle* werden überwiegend in Südafrika und Russland abgebaut. Bei *Lithium* ist es ein Triumvirat aus Australien,

China und Chile, das zusammen einen Marktanteil von mehr als drei Vierteln bei der Erzgewinnung besitzt.

Diese Angebotsabhängigkeit von wenigen Ländern birgt hohe Risiken. Zum einen können lokale Ereignisse wie Naturkatastrophen, Streiks oder Unfälle erheblichen Einfluss auf die kurzfristigen Marktsalden haben. Viele optimistische Angebotsprognosen haben sich dadurch schon in Luft aufgelöst. Ein aktuelles Beispiel ist die Force Majeure in der Grasberg-Mine in Indonesien, einer der größten, von Freeport McMoran betriebenen Kupferminen der Welt. Dort war nach einer Schlammlawine im September 2025, die mehrere Arbeiter das Leben kostete, die Produktion gestoppt worden, was erhebliche Auswirkungen auf die Kupfersversorgung bis weit in das Jahr 2026 hat.

Zum anderen birgt die Abhängigkeit von einzelnen Ländern auch politische Risiken. Exportkontrollen haben bei Metallen eine lange Historie und entladen sich nicht selten in einem Squeeze der Metallpreise. Zuletzt hat China seine Dominanz bei der Produktion von Seltenerden als Faustpfand im Zollstreit mit den USA eingesetzt, der Mitte Oktober 2025 rund um das Thema Seltene Erden zu eskalieren drohte. Die westlichen Industrieländer versuchen mit Hochdruck, Strategien zu entwickeln, wie die Importabhängigkeit von China langfristig reduziert werden kann.

V. Preis- und Konjunktursignale

Um einen ersten Überblick über etwaige Knappheitssituationen zu erhalten, ist die Bündelung der vielen einzelnen Metallpreise in verschiedene Metallsegmente sinnvoll. Neben den etablierten Metallen, die mit einer langen Historie von Futures- und Kassapreisen an der London Metal Exchange (LME) gehandelt werden (*Kupfer, Aluminium, Nickel, Zink, Zinn, Blei, Kobalt*), und den PGM-Metallen, die ebenfalls eine lange Kassapreishistorie haben, kommen die Preise für die kleineren Metalle zum allergrößten Teil aus China von der Shanghai Metal Exchange bzw. dem Shanghai Metal Market. In der folgenden Tabelle werden die für diese Studie verfügbaren Metallpreise zu einzelnen Metall-Indizes zusammengefasst. Für die LME-Metalle wurde der von der Börse berechnete LME-Index herangezogen. Bei den anderen, selbst errechneten Indizes gehen die einzelnen Metallpreise jeweils gleichgewichtet ein. Kreiert wurden auf diese Weise neben den Metallen der Platingruppe (PGM) ein Index für Batterie-, Legierungs- und Elektronikmetalle sowie ein Index für Seltene Erden. Diese Einteilung mag willkürlich erscheinen, da viele Metalle technologieübergreifend gebraucht werden, ist aber für die Übersichtlichkeit unerlässlich.

Tabelle 3: Metallsegmentindizes im Überblick

LME Metalle	PGM Metalle	Batteriemetalle	Legierungsmetalle	Elektrometalle	Seltene Erden
Kupfer	Rhodium	Kobalt	Titan	Silicon	Terbium
Aluminium	Iridium	Mangan	Bismuth	Selen	Dysprosium
Nickel	Platin	Graphit (ab Sept. 2021)	Chrom	Gallium	Praseodym
Zink	Palladium	Lithium (ab Mai 2023)	Zirconium	Indium	Neodym
Zinn	Ruthenium		Rhenium	Germanium	Erbium
Blei			Molybden		Gadolinium
			Tellur		Europium
			Niob		Yttrium
			Magnesium		Cerium
			Vanadium		Lanthan
			Tungsten		
			Beryllium		Samarium

Quelle: Micro Meets Macro Investment

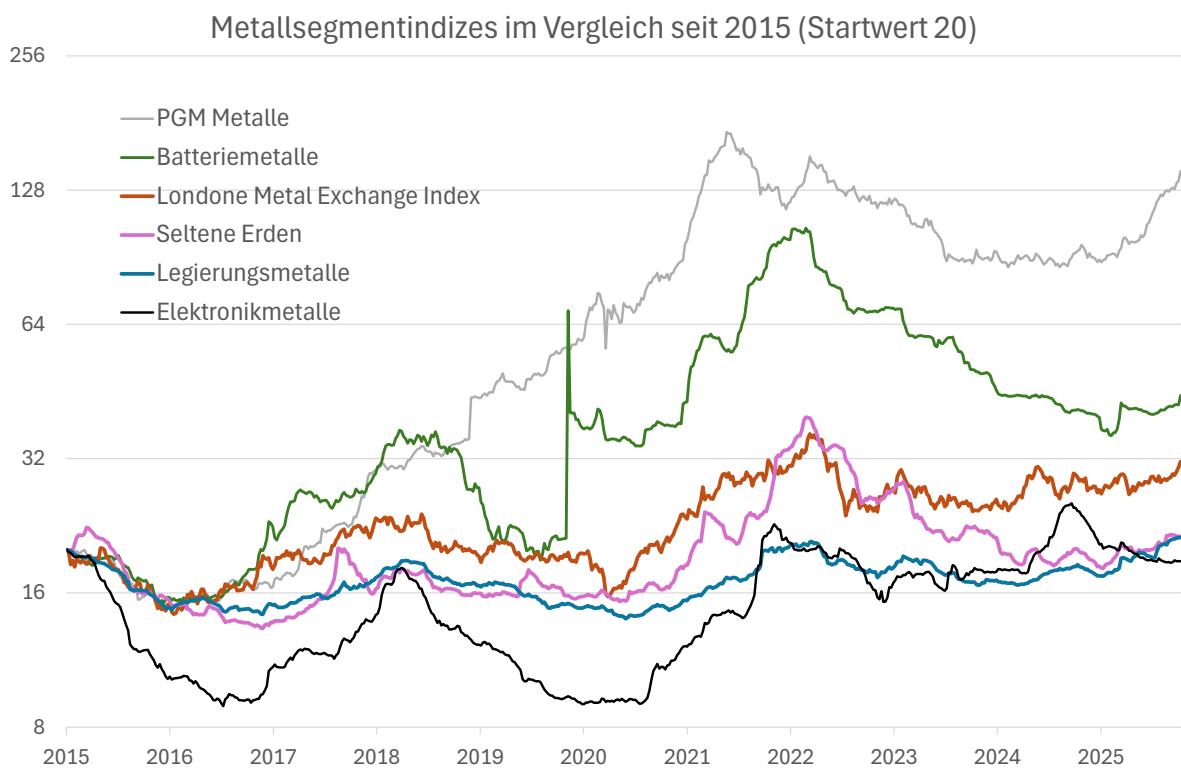
Von den meisten Metallpreisen kommen noch keine Knappheitssignale. Die mit Abstand beste Kursentwicklung seit 2015 haben die Metalle der Platingruppe. Der jüngste Kursaufschwung dürfte aber nur partiell mit der Spekulation auf einer Nachfragesteigerung in Zukunftstechnologien begründet sein, sondern koinzidiert vielmehr mit der Hause bei den anderen Edelmetallen Gold und Silber. Deren Preisentwicklung folgt anderen Gesetzmäßigkeiten als die der industriell verwendeten Metalle. Insofern sind die Platinmetalle hier als positiver Ausreißer anzusehen, der nicht zwingend auf einen industriellen Mehrbedarf schließen lässt.

Ebenfalls überdurchschnittlich fiel die Kursentwicklung der Batteriemetalle aus. Die Daten sind mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren, da in diesen Index nur wenige Metalle eingehen und zudem bei zwei Metallen nur eine sehr kurze Kurshistorie vorliegt. Der Großteil der positiven Performance wurde im Post-Corona-Boom des Jahres 2021 gemacht. Seit Jahresbeginn 2022 bröckelte aber ein guter Teil der Kursgewinne wieder ab. Im Jahr 2025 deuten die Batteriemetalle eine Bodenbildung an.

Das Gleiche lässt sich über den LME-Index und über die Indizes für Seltene Erden und Legierungsmetalle sagen. Die Preissignale sind in diesem Jahr angesichts verhaltener Konjunktursignale erstaunlich positiv. Bei den LME-Metallen mag dies dem Umstand geschuldet sein, dass sie bei dem ein oder anderen Makro-Fonds als eine Variante, um einen Konjunkturaufschwung zu spielen, weit oben auf dem Zettel stehen. Die positive Kursentwicklung der LME-Metalle korrelierte mit einer starken Performance der internationalen Aktienmärkte, die den Konjunkturindikatoren in der Regel vorauslaufen. Auch die börsennotierten Metallproduzenten zeigen seit April 2025 gegenüber dem Gesamtaktienmarkt relative Stärke.

Der jüngste Aufschwung bei den Seldernen Erden kann zumindest partiell auf Exportbeschränkungen Chinas und den schwelenden Zollstreit mit den USA zurückgeführt werden. Dennoch ist die Bodenbildung der Preise aus technischer Sicht noch nicht abgeschlossen und ein internationaler Konjunkturaufschwung ist trotz der Signale von den Aktienmärkten keineswegs gesichert. Die Risiken für einen allgemeinen Kursrückgang an den Aktien- und Metallbörsen sind meines Erachtens nach wie vor sehr hoch. Eines ist jedoch sehr wahrscheinlich: Im nächsten Konjunkturaufschwung, wann auch immer dieser zu terminieren ist, werden viele Metalle erneut eine Hause vergleichbar mit der der Jahre 2020/21 hinlegen, die angesichts der prognostizierten Angebotsdefizite der Ausgangspunkt für eine langfristige überdurchschnittliche Kursentwicklung sein sollte.

Schaubild 3: Metallsegmentindizes seit 2015, indiziert auf den Startwert 20



Quelle: Refinitiv, Micro Meets Macro Investment

VI. Fazit

Metalle spielen bei vielen zukünftigen Schlüsseltechnologien eine bedeutende Rolle. Insbesondere bei den grünen Technologien, die für die Erreichung von CO₂- und Klimazielen gebraucht werden. Es zeichnen sich bei den Schlüsselmetallen der Energiewende nach heutigem Technologiestand ab dem Jahr 2030 hohe Angebotsdefizite ab, die durch bestehende Angebotsrisiken noch verschärft werden könnten. Der nächste internationale

Konjunkturaufschwung dürfte bei vielen Metallpreisen der Startschuss zu extremen Aufwärtsbewegungen werden, die aufgrund der strukturellen Knaptheit dann über viele Jahre anhalten. Noch ist dieser Startschuss aber nicht zweifelsfrei erfolgt.

Über den Autor:



Markus Mezger

Vorstand für Portfoliomanagement und Research
mit 2 Mrd. \$ AuM (für 2005-2014)
Volkswirt



Portfolio-Manager

- Global Macro
- Rohstoff Futures
- Gold und Goldaktien

Berufliche Stationen

- Tiberius Asset Management (Mitgründer)
- BW-Bank Asset Management
- IBM Deutschland