

MINERALISCHE ROHSTOFFE FÜR DIE ENERGIEWENDE

Ulrike Dörner und Maren Liedtke



Foto: © Ingo Bartussek - Fotolia.com

EINLEITUNG

Mit der Energiewende wird die deutsche Energieversorgung grundlegend umgestaltet – dies betrifft sowohl die Technologien als auch deren spezifischer Rohstoffbedarf. Die Grundidee des Energiekonzepts der Bundesregierung ist der Ausbau der Erneuerbaren Energien als Alternative zur Kernkraft und zur Kohleverstromung. In Deutschland lag 2014 der Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch bei 13,4 % und am Bruttostromverbrauch bei 27 %. Laut Energiekonzept soll ihr Anteil am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 auf 18 % und bis 2050 auf 60 % erhöht werden. Im Falle der Stromerzeugung soll bis 2050 der Anteil der Erneuerbaren Energien auf 80 % steigen.

Für die Umgestaltung des deutschen Energieversorgungssystems müssen bereits vorhandene Erneuerbare-Energetechnologien, wie beispielsweise Wasserkraft, Windkraft und Solarenergie, ausgebaut werden. Darüber hinaus können weitere Technologien wie solarthermische Kraftwerke zukünftig für den Strommix in Deutschland relevant werden. Parallel werden auch die hierfür benötigten Infrastrukturtechnologien zur Speicherung und Verteilung von Strom, Wärme und Kraftstoffen an Bedeutung zunehmen.

Für den Ausbau und die Entwicklung der Erneuerbaren-Energetechnologien werden mineralische Rohstoffe benötigt. Bei den Metallrohstoffen

sind dies neben Eisen und Stahlveredlern derzeit überwiegend Basis- und Elektronikmetalle wie Kupfer (Cu), Silizium (Si), Lithium (Li), Kobalt (Co), Indium (In), Tellur (Te), Kadmium (Cd), Gallium (Ga) und Seltene Erden (SE) sowie zahlreiche weitere Metalle (Tab. 1).

Tab. 1: Beispiele für Erneuerbare-Energiotechnologien und dafür benötigte Rohstoffe (Quellen: WUPPERTAL INSTITUT 2014, MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Erneuerbare-Energiotechnologie	Ausgewählte Rohstoffe
Photovoltaik	Ag, Sn, In, Ge, Ga, Se, Cd, Te, Cu, Si, Mo
Solarthermische Kraftwerke	Ag, Cu, Na, K
Windkraftanlagen	Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Dy, Nd, Pr, Tb, Fe, B, Co,
Wasserkraftanlagen	Ni, Cr, Pb, Zn, Cu, Stahl, Al, Mg, Mn, Ti, Zn, Mo, Zr, Ba
Geothermische Kraftwerke	Stahl und Legierungselemente (Ti, Mn, Nb, V, Cr, Cu, Mo, Ni, Co, Ta)
Lithium-Ionen-Batterien	Li, Co, Ni
Redox-Flow-Speicher	Fe, Cr, V, Zn
Bioenergie (Biofuels)	Co, Ni, PGE, Ru

Bedeutende Mengen an Steine und Erden, wie Sand, Kies, gebrochene Natursteine, Tone, Kalk- und Mergelsteine, werden beispielsweise für die Produktion von Beton für Bauwerke und Fundamente eingesetzt. Industriemineralien, wie Graphit, Quarz, Stein- und Kalisalz, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Beispielsweise bilden Quarzrohstoffe die Grundlage der für Reflektoren erforderlichen Gläser bzw. werden für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) benötigt, die zur Herstellung von Rotorblättern für Windkraftanlagen zum Einsatz kommen.

BEISPIELE FÜR ENERGIE-TECHNOLOGIEN

Innovationen und Effizienzsteigerungen für neue Technologien erfordern oftmals völlig neue Roh-

stoffkomponenten. Beispielsweise kommen insbesondere in großen wartungsarmen Windkraftanlagen für den Offshore-Bereich Seltene Erden wie Neodym (Nd), Praseodym (Pr) und Dysprosium (Dy) als Bestandteile von Permanentmagneten für die Generatoren zum Einsatz (Abb. 1). Windkraftanlagen an Land („onshore“) befinden sich bereits in der breiten Anwendung, wohingegen Windkraftanlagen auf See („offshore“) noch ein erhebliches Wachstumspotenzial bieten. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass der Anteil der Offshore-Anlagen an der globalen Windenergieleistung von 2,1 % (2013) auf ca. 20 % (2035) steigen wird (IEA 2013). Permanentmagnetisch angetriebenen Direct-Drive-Windkraftanlagen (PM-DD) wird in diesem Segment eine große Zukunft zugeschrieben. PM-DD benötigen deutlich höhere Magnetmassen als andere Antriebstechnologien. Die eingesetzte Menge von Neodym liegt zwischen 194 und 201 kg/MW, die von Dysprosium zwischen 13 und 29 kg/MW.

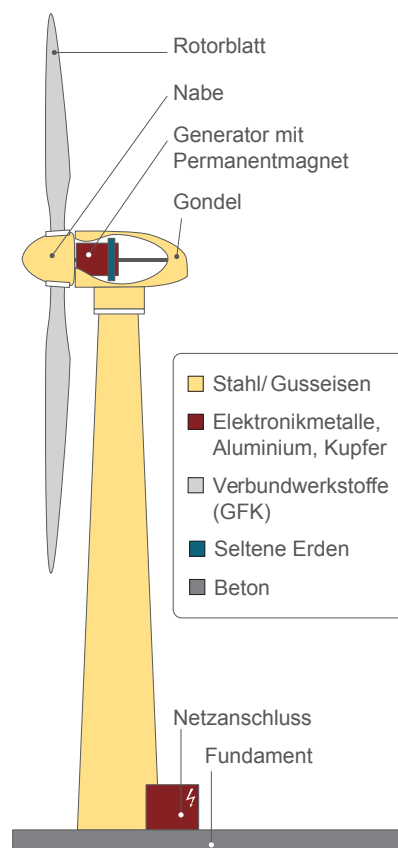


Abb. 1: Aufbau einer Windkraftanlage.

Auf dem Photovoltaikmarkt dominieren mit rund 90 % der ausgelieferten Module Dickschichtsolarzellen der kristallinen Siliziumwafer-Technologie. Der Dünnschichttechnologie wird allerdings

setzung und dem Wirkungsgrad der Solarzelle, von Materialverlusten während der Beschichtung bzw. der Ausschussware und dem Anteil recycelten Materials.

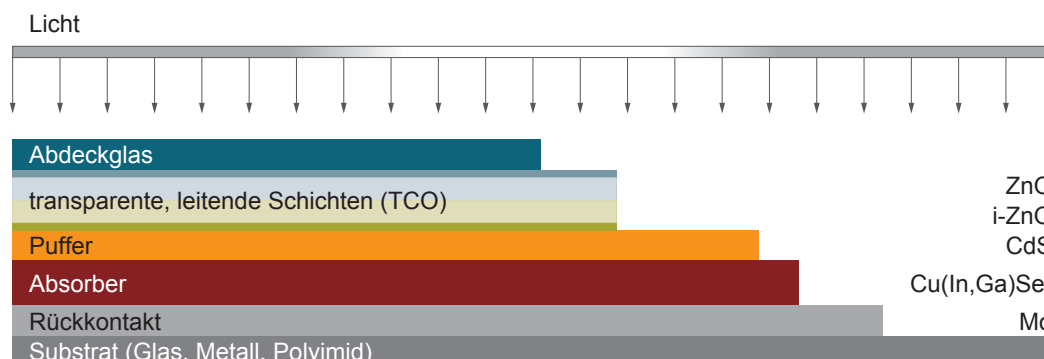


Abb. 2: Aufbau einer Dünnschichtsolarzelle (CIGS).

innerhalb der Photovoltaik ein hohes Potenzial zugeschrieben. Bei Dünnschichtsolarzellen bestehen die Beschichtungsmaterialien z. B. aus amorphem Silizium (a-Si), Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenid (CIGS) oder Kadmium-Tellurid (CdTe). Die Dünnschicht-Zelltypen sind seit

Redox-Flow-Batterien können als Pufferspeicher für fluktuierende Stromerzeugung (z. B. Sonnen- oder Windenergie) eingesetzt werden. Die Vanadium-Redox-Batterie (VRB), bei der Vanadium in beiden Halbzellen genutzt wird (Vanadium/Vanadium-System), ist am

Tab. 2: Weltproduktion ausgewählter Rohstoffe und produktionsspezifischer Rohstoffbedarf im Jahr 2013 für Dünnschicht-Photovoltaik (DS-PV) (Quellen: BGR 2016, MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Rohstoff	Weltproduktion 2013 [t]	Rohstoffbedarf für DS-PV 2013 [t]	Spezifischer Rohstoffbedarf für CIGS* [g/kW _p]	Spezifischer Rohstoffbedarf für CdTe [g/kW _p]
Indium	790	35 – 103	23 – 67	
Gallium	350	11 – 45	7 – 30	
Selen	3.000	92 – 230	60 – 150	
Kadmium	22.750	178 – 315		60 – 105
Tellur	500 – 550	201 – 355		67 – 119

* Stöchiometrie: Cu(In_{0,7}Ga_{0,3})Se₂

mehreren Jahren kommerziell verfügbar und hatten im Jahr 2011 einen Marktanteil von etwa 3,4 % (a-Si), 5,5 % (CdTe) und 2,4 % (CIGS) an der gesamten Solarzellenproduktion (37,2 GWp) (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016). In Abbildung 2 ist der Aufbau einer CIGS-Solarzelle dargestellt. Den produktionsspezifischen Rohstoffbedarf der Halbleiterverbindungen der Dünnschichtelemente von CdTe- bzw. CIGS-Dünnschichtmodulen zeigt Tabelle 2. Der produktspezifische Rohstoffinhalt pro elektrische Leistung (Watt Peak, Wp) ist abhängig von der Schichtdicke, der Zusammen-

weitesten verbreitet. Vanadium (V) liegt hier in vier verschiedenen Wertigkeiten vor und wird an beiden Elektroden verwendet (Abb. 3). Die Vanadium-Redox-Batterien sind bereits im Einsatz und könnten für den in den kommenden Jahren auftretenden Speicherbedarf eine Lösung darstellen. Der produktionsspezifische Rohstoffbedarf für Vanadium ist in Tabelle 3 dargestellt.

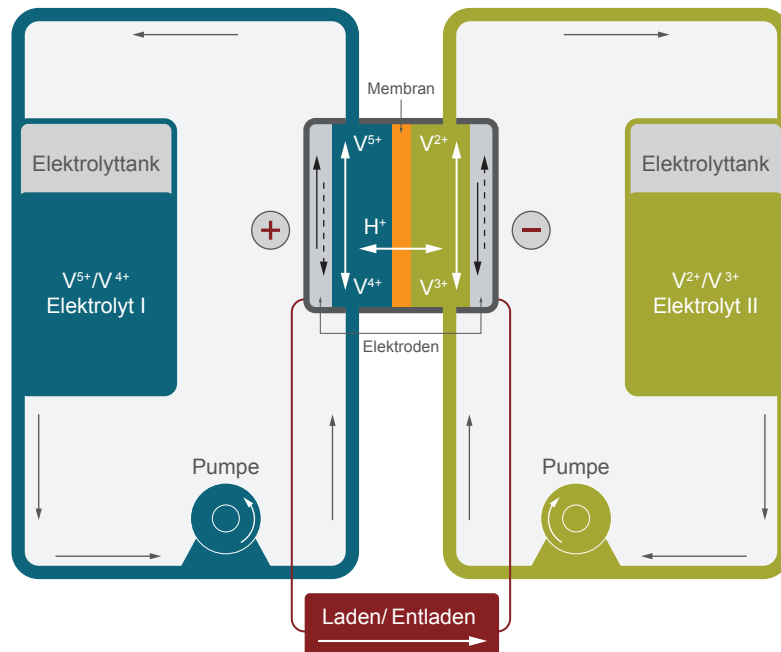


Abb. 3: Aufbau und Funktion einer Vanadium-Redox-Batterie.

Tab. 3: Weltproduktion und produktionsspezifischer Bedarf an Vanadium im Jahr 2013 für Vanadium-Redox-Batterien (VRB) (Quellen: BGR 2016, MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

	Weltproduktion 2013 [t]	Rohstoffbedarf für VRB 2013 [t]	Spezifischer Rohstoffbedarf (Vanadium/Vanadium-System) [kg/kWh]
Vanadium	80.970	3.000	2,92

BEISPIELE MINERALISCHER ROHSTOFFE FÜR DIE ENERGIEWENDE

Indium

Indium fällt als Beiprodukt bei der Verhüttung sulfidischer Zinkerze an. Die jährliche Produktionsmenge liegt bei knapp 800 t. Die Angebotskonzentration (HHI¹ > 3.000) ist hoch. Die größten Produktionsländer sind China (50 %), die Republik Korea (22 %) und Japan (10 %) (Abb. 4). Das wichtigste Anwendungsgebiet von Indium liegt derzeit in Dünnschichten von Indium-Zinn-Oxi-

den („indium-tin oxides“, ITO) in Flüssigkristallanzeigen (LCD) bzw. Flachbildschirmen, die in der Unterhaltungselektronik eingesetzt werden. Darüber hinaus wird Indium zunehmend für die Produktion von Solarzellen (Kupfer-Indium-Selenid bzw. -Sulfid-Zellen) verwendet.

Gallium

Gallium wird nur in geringen Mengen gewonnen bzw. technologisch eingesetzt (im Jahr 2013 um 350 t). Die Gewinnung erfolgt als Beiprodukt im Zuge der Herstellung von Aluminium oder Zink. Die Produktionskapazitäten für Rohgallium liegen bei rund 600 t/a (Abb. 4) und sind stark konzent-

¹Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ist eine Kennzahl, die die unternehmerische Konzentration in einem Markt angibt. Er wird durch das Summieren der quadrierten Marktanteile aller Wettbewerber errechnet. Märkte mit HHI-Werten zwischen 1.500 und 2.500 werden als mäßig konzentriert bewertet, Märkte mit Werten > 2.500 gelten als hoch konzentriert.

riert (HHI > 6.000). Bei weitem größtes Produktionsland ist China. Hauptanwendungsgebiet von Gallium ist die Herstellung von III/V-Halbleitern wie Galliumarsenid und Galliumnitrid für integrierte Schaltkreise und optoelektronische Geräte (LEDs, Laserdioden, Photodioden, Solarzellen). Der Bedarf für Solarmodule liegt bei unter 10 %.

Tellur

Tellur findet bisher nur in geringem Maß Anwendung. Tellur wird zu etwa 90 % als Beiprodukt aus dem Anodenschlamm, der bei der elektrolytischen Kupferraffination anfällt, gewonnen. Die weltweite Jahresproduktion wird auf etwa 500 t geschätzt (Abb. 4). Die größten Produzenten sind China, Japan und Belgien. Die Angebotskonzentration ist unkritisch (HHI < 1.000). Größtes Anwendungsgebiet mit rund 40 % sind Kadmiumtellurid-(CdTe)-Dünnschicht-Solarzellen. Daneben findet Tellur u. a. Anwendung in thermoelektrischen Bauteilen und der Metallurgie, speziell als Legierungsadditiv in Stahl.

Selen

Selen kommt wie Tellur als Beiprodukt aus den Anodenschlämmen der Kupferraffinerien. Sehr geringe Mengen fallen auch als Beiprodukt der Gold-, Blei-, Nickel-, Platin- und Zinkproduktion an. Etwa 2.500 – 3.000 t Selen werden jährlich in einer Vielzahl von Ländern gewonnen (HHI 1.180, Abb. 4). China, Japan, die USA und Deutschland sind die größten Produzenten. Die kommerzielle Hauptanwendung von Selen liegt in der Metallurgie (40 %), der Glasproduktion, der Landwirtschaft (Düngemittel, Tiernahrung, Nahrungsergänzungsmittel), der chemischen Industrie, der Elektrotechnik sowie der Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen (< 10 %).

Kadmium

Kadmium ist ein Beiprodukt von Zink. Die weltweite Jahresproduktion liegt bei über 22.500 t. Der Angebotsmarkt ist gering bis mäßig konzentriert (HHI > 1.500). China (33 %), die Republik Korea (17 %) und Japan (8 %) waren im Jahr 2013

die Hauptproduzenten (Abb. 4). Kadmium wird in erster Linie (> 80 %) für die Herstellung von Nickel-Kadmium-Batterien verwendet. Weitere Verwendungszwecke sind Pigmente, Stabilisator von Kunststoffen, Korrosionsschutzmittel sowie CdTe-Solarmodule (< 1 %).

Vanadium

Vanadium wird hauptsächlich aus vanadiumführenden Titanomagnetiten und Schlackerückständen bei der Roheisen- bzw. Stahlproduktion gewonnen, wobei durch letzteres ca. 70 % des jährlichen Vanadiumangebots zur Verfügung gestellt werden. Im Jahr 2013 wurden weltweit 81.000 t Vanadium bergmännisch gefördert. Die wichtigsten Bergbauländer sind China (54 %), Südafrika (26 %) und die Russische Föderation (18 %). Die Länderkonzentration der Bergwerksförderung ist hoch (HHI 3.970, Abb. 4). Vanadium (vor allem Ferrovandium) wird zu über 85 % als Stahlveredler verwendet. Weitere Anwendung findet Vanadium u. a. in Katalysatoren, in der chemischen sowie in der keramischen Industrie. Darüber hinaus wird Vanadium bzw. Vanadiumpentoxid (V_2O_5) in Redox-Flow-Elektrizitätsspeichern als Hauptelektrolyt eingesetzt (< 5 %).

Seltene Erden

Unter dem Begriff Seltene Erden (SE) werden Lanthan (La) und die im Periodensystem auf das Lanthan folgenden 14 Elemente, die Lanthanoide (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) sowie Yttrium und Scandium zusammengefasst. Die Lanthanoide kommen nur gemeinsam vor und können auch nur zusammen abgebaut werden. SE werden in leichte (La – Nd) und schwere SE (Sm – Lu) eingeteilt. Neodym und Praseodym gehören zu den leichten SE, Dysprosium zählt zu den schweren. In der großen Mehrheit der SE-Lagerstätten sind die schweren SE in nur sehr geringen Konzentrationen vertreten, der Anteil leichter SE beträgt meist deutlich > 90 %.

In den letzten Jahren lag die Bergwerksförderung der Seltene Erden bei 100.000 t Seltene-Erdoxide (SEO). Die Gewinnung konzentrierte sich auf

nur vier Länder: China (> 90 %), Australien (Aufbereitung in Malaysia), Russland und USA (HHI > 8.000, Abb. 4). Des Weiteren wird Monazit (ein Schwermineral aus dem Seltene Erden gewonnen werden können) in kleineren Mengen auch in Malaysia, Brasilien, Indonesien und Vietnam gefördert. Alle schweren Seltenen Erden wurden bisher nur in China produziert.

Seltene Erden werden heute fast ausschließlich nach element- und hochreiner Aufbereitung in zahlreichen Hochtechnologiebereichen eingesetzt. Sie werden z. B. für leistungsstarke Magnete (20 %), Legierungen (u. a. für NiMH-Batterien) (19 %), Chemie- und Erdölkatalysatoren (19 %), Politurmittel (17 %), Leuchtmittel (7 %), Spezialgläser (6 %) und Keramik (Y-stabilisierte ZrO₂-Keramik, Glasuren) (6 %) eingesetzt. Neodym und Dysprosium werden insbesondere für die Herstellung besonders leistungsstarker Neodym-Eisen-Bor-Magnete in Hochtemperaturanwendungen benötigt. Beispiele sind getriebelose, dadurch wartungsärmere Windkraftanlagen oder auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge.

HERAUSFORDERUNGEN AUF DEN ROHSTOFFMÄRKTEN

Mengenmäßig sind es vor allem Baurohstoffe sowie Stahl und Basismetalle wie Aluminium und Kupfer, die für den Anlagen- und Netzausbau im Rahmen der Energiewende benötigt werden. Bei einer Vielzahl der verwendeten Rohstoffe handelt es sich allerdings um Spezialmetalle, die aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften unverzichtbar für Anwendungen in der Hightech-Branche sind. Die Märkte dieser Spezialmetalle sind vergleichsweise klein und die Gewinnung erfolgt meist als Beiprodukt im Zuge der Produktion von Industriemetallen wie Tonerde/Aluminium, Kupfer oder Zink. Die Abbau- und Aufbereitungsprozesse sind im Wesentlichen auf eine Maximierung des Ausbringens dieser Industriemetalle (Hauptwertmetalle) orientiert. Die Märkte der Spezialmetalle können weniger schnell auf Nachfragesprünge reagieren als die großen Märkte der Industrie-

metalle. Durch technologische Entwicklungen induzierte Nachfragespitzen bei Spezialmetallen können daher zu Rohstofflieferengpässen und damit verbundenen Preispeaks führen.

Bei einigen Rohstoffen besteht eine hohe Angebotskonzentration und die Gewinnung erfolgt in Ländern mit erhöhten politischen und wirtschaftlichen Risiken. Die Ausübung von Marktmacht wie beispielsweise Förderquoten und der Auf- und Ausbau von Handelsbarrieren, abnehmende Investitionssicherheit oder Umwelt- und soziale Risiken können zu erheblichen Lieferrisiken in der Beschaffung führen und Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit der gesamten Wertschöpfungskette haben.

Für die Analyse der globalen Angebotskonzentration wird der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) der Rohstoffproduktion verwendet. Ab einem HHI von >2.500 gilt der Markt als hoch konzentriert, bei einem Maximalwert von 10.000 gibt es nur einen Anbieter (DERA 2015). Der HHI von Erdöl lag 2013, selbst bei Betrachtung der zwölf OPEC-Staaten als marktwirtschaftliches Kartell, mit einem Wert von knapp 2.000 (CIA 2015) im mittleren Bereich und damit deutlich entfernt von der kritischen Marke von 2.500. Im Vergleich dazu liegt die Marktkonzentration für viele für die Energiewende relevanten mineralischen Rohstoffe und deren Zwischenprodukte weit oberhalb der Marke von 2.500 (Abb. 4).

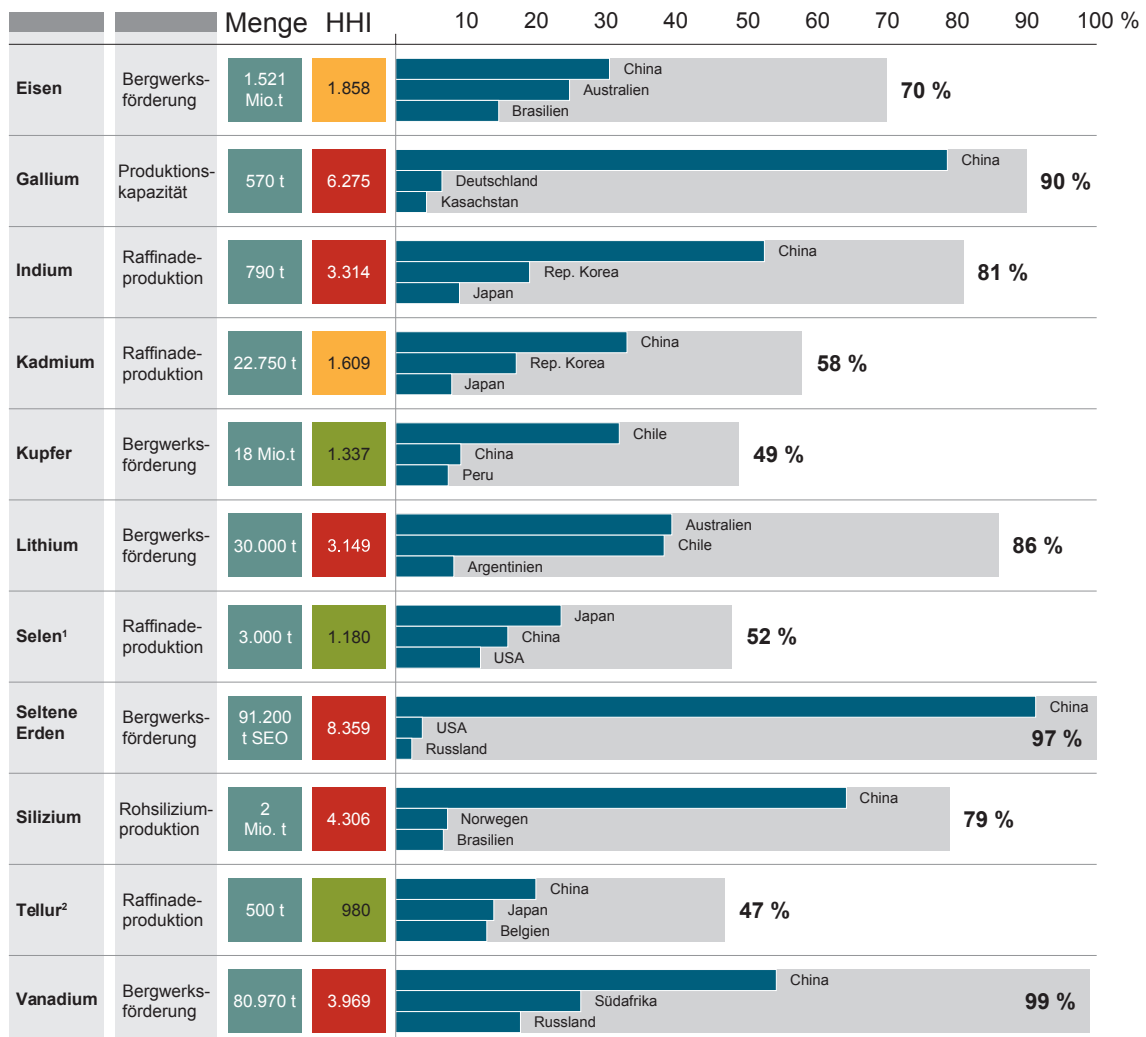
Darüber hinaus weisen die Produzentenländer für die Bergwerks- oder Raffinadeproduktion einer Vielzahl von Rohstoffen ein erhebliches Länderisiko auf. Dies trifft insbesondere für Rohstoffe wie die Seltenen Erden und deren Zwischenprodukte zu, sowie für Elektronikmetalle wie Silizium, Gallium oder Indium. Die sichere und nachhaltige Versorgung mit den für die Energieversorgung relevanten Rohstoffen stellen sowohl den Bergbau- und Recyclingsektor als auch die Produzenten von Zwischenprodukten aus dem verarbeitenden Gewerbe vor neue Herausforderungen.

Vor allem ist bis heute nicht sicher, welche Erneuerbaren-Energietechnologien mit welchem „Rohstoffmix“ sich am Markt zukünftig durchset-

zen werden. Selbst bei den relativ weit entwickelten Wind- und Solarkraft-Technologien ist nicht klar, welche Permanentmagnet- oder Solarzellen-Typen sich aufgrund neuer Innovationen und Effizienzsteigerungen langfristig etablieren werden. Da Rohstoffmärkte Nachfrage getrieben sind, bedeutet dies, dass sich Rohstoffproduzenten zukünftig auf eine sich verändernde Nachfrage im Rahmen der Energiewende einstellen müssen und dies auch erhebliche Auswirkungen auf die Preisvolatilität von Rohstoffen haben kann.

FAZIT

Für die Bereitstellung Erneuerbarer-Energietechnologien sind mineralische Rohstoffe von großer Bedeutung. Der hohe prognostizierte Bedarf von spezifischen Rohstoffen für diese Technologien und die hohe Angebotskonzentration auf wenige Produktionsländer bei vielen dieser Rohstoffe kann zu erhöhten Lieferrisiken oder zu einer Verschiebung in der Preisgestaltung führen. Auf kleine Rohstoffmärkte wie z. B. die von Indium, Gallium, Tellur und schwere Seltene Erden kann der Ausbau der Erneuerbaren-Energietechnologien bedeutenden Einfluss ausüben und die Nachfrage nach Bereitstellung von Produktionskapazitäten sprunghaft erhöhen.



¹ = geschätzte Werte, ² = geschätzte Werte für 2011 nach Daten von WILLIS et al. (2012),

HHI = Herfindahl-Hirschman-Index, SEO = Seltene-Erdoxide

Abb. 4: Jahresproduktion und globale Angebotskonzentration (HHI) für 2013.

LITERATUR

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2016): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover.

CIA – CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (2015): The World Factbook – Country comparison: crude oil production. – URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2241rank.html>. [Stand 02.09.2015].

DERA – DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR (2015): DERA-Rohstoffliste 2014: Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken. – DERA Rohstoffinformationen 24: 114 S.; Berlin.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013): World Energy Outlook 2013: Chapter 6 - Renewable Energy Outlook: 197 - 232. – URL: http://www.worldenergyoutlook.org/media/weoweb-site/2013/WEO2013_Ch06_Renewables.pdf [Stand 02.01.2016].

MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., LANGKAU, S., HUMMEN, T., ERDMANN, L., TERCERO ESPINOZA, L., ANGERER, G., MARWEDE, M. & BENECKE, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. – DERA Rohstoffinformationen 28: 353 S.; Berlin.

WILLIS, P., CHAPMAN, A. & FRYER, A. (2012): Study of By-Products of Copper, Lead, Zinc and Nickel. – A report by Oakdene Hollins for International Lead and Zinc Study Group, International Nickel Study Group, International Copper Study Group: 218 S.; ILZSG Main Report.docx.

WUPPERTAL INSTITUT (2014): KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. – Abschlussbericht 0325324 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): 277 S.; Wuppertal. – URL: <http://wupperinst.org/de/projekte/details/wi/p/s/pd/38> [Stand 15.12.2015].

IMPRESSUM

Herausgeber:

© **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Juli 2016**

B1.1 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25-30 | 13593 Berlin-Spandau

E-Mail: dera@bgr

www.deutsche-rohstoffagentur.de

www.bgr.bund.de