



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Februar 2017
Stellungnahme

Rohstoffe für die Energiewende

Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften | www.akademienunion.de

Impressum

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Geschäftsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Redaktion

Selina Byfield, acatech

Wissenschaftliche Koordination

Dr. Berit Erlach, acatech
Jakob Kullik, Technische Universität Chemnitz

Produktionskoordination

Marie-Christin Höhne, acatech

Gestaltung und Satz

Atelier Hauer + Dörfler GmbH, Berlin

Druck

Königsdruck, Berlin

ISBN: 978-3-8047-3664-1

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Widergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Gedruckt auf säurefreiem Papier
Printed in EC

Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.

Rohstoffe für die Energiewende

Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung

Vorwort

Hätte Marion King Hubbert Recht behalten, würden die USA heute kaum noch Erdöl fördern: Der US-Geologe hatte „Peak Oil“, das Produktionsmaximum, für das Jahr 1971 vorhergesagt. Danach sollte die Förderung allmählich zurückgehen, bis die Vorkommen irgendwann erschöpft wären. Hubberts Vorhersagen sind bis heute nicht eingetreten. Nicht vorhergesehen hatte er zum Beispiel den Erfolg der Fracking-Technologie: In Zeiten hoher Ölpreise wurde Fracking plötzlich rentabel und ermöglichte die Erschließung neuer Reserven.

Das Beispiel illustriert, wie Marktmechanismen und Technologieentwicklung die Reichweite eines Rohstoffs beeinflussen können, nicht nur bei fossilen Energieträgern. Mit der Technologisierung fast aller Lebensbereiche sind „exotische“ Mineralien und Metalle wie Gallium, Indium, Tellur und Seltene Erden wertvolle Handelsgüter geworden. Die Wirtschaft reagiert derweil sensibel auf Entwicklungen an den Metallmärkten: Der Wirtschaftsboom in China ab 2003 wirkte beispielsweise nicht nur als Preistreiber, sondern führte auch zu Versorgungsengpässen. Geopolitische Konflikte oder Exportquoten auf bestimmte Metalle können ähnliche Folgen haben.

Auch in der Energiebranche sind Hightech-Metalle unverzichtbar: für den Ausbau von Windkraft- und Solaranlagen, Übertragungs- und Verteilnetzen und Energiespeichern. Wäre ein wichtiges Metall lange Zeit sehr teuer oder am Markt nicht mehr verfügbar, könnte auch die Energiewende ins Stocken geraten. Aus dieser Perspektive veranschaulicht die vorliegende Stellungnahme, wie eng die Rohstoffsicherheit in Deutschland mit der Energieversorgungssicherheit verknüpft ist. Und sie erläutert Maßnahmen, die – über die nationale Rohstoffstrategie von 2010 hinaus – dazu beitragen können, die Versorgung mit Rohstoffen für die Energiewende zu sichern.

Damit baut die Stellungnahme auf den Ergebnissen der Analyse *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse* auf, welche die AG „Ressourcen“ des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet hat. Wir danken den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie den Gutachtern herzlich für ihr Engagement.



Prof. Dr. Jörg Hacker
Präsident
Nationale Akademie der
Wissenschaften Leopoldina



Prof. Dr. Reinhard F. Hüttel
Präsident
acatech – Deutsche Akademie der
Technikwissenschaften



Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt
Präsident
Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften

Inhalt

	Vorwort	3
	Abkürzungen	6
	Einheiten	6
	Zusammenfassung.....	7
1	Einleitung.....	13
2	Ausgangslage: Wichtige Fragen zur Rohstoffversorgung für die Energiewende	14
	2.1 Welche Metalle werden für die Energiewende benötigt?.....	14
	2.2 Welche Energierohstoffe brauchen wir künftig noch?	15
	2.3 Woher stammen die in Deutschland genutzten Rohstoffe?	15
	2.4 Sind die primären Rohstoffvorkommen bald erschöpft?.....	17
	2.5 Welche Rolle kann Metall-Recycling spielen?.....	18
	2.6 Wie entwickeln sich Versorgungssicherheit und Rohstoffpreise?	19
	2.6.1 Die Dynamik der globalen Märkte.....	19
	2.6.2 Wann Rohstoffe „kritisch“ sind.....	21
	2.7 Strategische Rohstoffpolitik: Welche Rolle kann der Staat spielen?.....	23
	2.8 Welche Risiken birgt die Rohstoffgewinnung für Mensch und Umwelt?.....	25
3	Handlungsoptionen: Metallische Rohstoffe	28
	3.1 Expertise und Wissenstransfer	28
	3.1.1 Offenlegungspflicht für geologische Daten	29
	3.1.2 Internationale Vernetzung	29
	3.1.3 Rohstoffexpertise in Deutschland stärken	30
	3.2 Versorgungssicherheit	31
	3.2.1 Recycling.....	31
	3.2.2 Diversifizierte Bezugsquellen	36
	3.2.3 Marine Rohstoffe	46
	3.2.4 Lagerhaltung	48

3.3 Ressourceneffizienz	51
3.3.1 Exploration, Abbau und Aufbereitung.....	51
3.3.2 Nutzung in Industrie und Haushalten.....	53
3.4 Internationale Rohstoffpolitik	55
3.4.1 Globale Ansätze.....	55
3.4.2 Bilaterale Ansätze.....	56
3.4.3 Zentraler Ansprechpartner für Rohstofffragen.....	57
3.4.4 Transparenzmechanismen	57
4 Handlungsoptionen: Energierohstoffe	61
4.1 Biomasse als Energiequelle	61
4.1.1 Reduktion der ökologischen Folgen und der Nahrungsmittelkonkurrenz	64
4.1.2 Erschließung zusätzlicher Potenziale.....	70
4.1.3 Gezieltere Nutzung der Vorteile von Bioenergie.....	72
4.1.4 Recyceln von Phosphaten als Düngemittel und Futterzusatz.....	73
4.2 Fossile Energierohstoffe	74
4.2.1 Erdgasspeicher	75
4.2.2 Lieferländer für Erdgas diversifizieren.....	76
4.2.3 Unkonventionelle Vorkommen nutzen.....	76
4.2.4 Alternative gasförmige Energieträger.....	77
5 Fazit	78
Glossar.....	88
Literatur.....	90
Über das Akademienprojekt.....	102

Abkürzungen

BECCS	Bio-energy with Carbon Capture and Storage, Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und Speicherung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CCS	Carbon Capture and Storage, CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization, Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CO₂	Kohlendioxid
DERA	Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EITI	Extractive Industry Transparency Initiative
EROI	Energy Return on Investment, Erntefaktor, der eingesetzte und gewonnene Energie in Beziehung setzt
ICMM	International Council of Mining & Minerals
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
LME	London Metal Exchange
LNG	Liquefied Natural Gas, Flüssigerdgas
THG	Treibhausgas
UFK	Ungebundene Finanzkredite
WTO	World Trade Organization, Welthandelsorganisation
WEA	Windenergieanlage
η	Wirkungsgrad

Einheiten

g/kWh	Gramm pro Kilowattstunde
Gt	Gigatonne
m²	Quadratmeter
TWh	Terawattstunde

Zusammenfassung

Durch die Energiewende ändert sich Deutschlands Rohstoffbedarf. Wird sie erfolgreich umgesetzt, sinkt der Verbrauch an fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Zudem ließen sich bereits in der Zeit des Übergangs zu einem nachhaltigeren Energiesystem die CO₂-Emissionen durch den verstärkten Einsatz von Erdgas statt Kohle reduzieren. Darüber hinaus könnte die Bioenergie dabei helfen, die volatile Einspeisung von Wind- und Solarenergie auszugleichen und so zu einer stabilen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien beitragen. Gleichzeitig steigt jedoch der Bedarf an Elementen wie Stahl, Kupfer, Kobalt, Lithium, Seltenen Erden, Platingruppenelementen, Indium oder Tellur, um Erneuerbare-Energie-Anlagen, Speicher und intelligente Netze auszubauen.

Geologisch gesehen gibt es weltweit sowohl genügend Metalle als auch Energierohstoffe, um bis zum Jahr 2050 ein klimafreundliches Energiesystem aufzubauen. Entscheidend wird allerdings sein, dass die Wirtschaftlichkeit der dabei anstehenden Investitionen nicht durch einen starken Anstieg der Preise der dazu benötigten Rohstoffe zunichte gemacht wird. Um der deutschen Wirtschaft zu ermöglichen, ihre Rohstoffversorgung langfristig zu sichern, ist eine vorausschauende Politik erforderlich. In dieser Stellungnahme werden Maßnahmen vorgestellt, die zu einer möglichst sicheren, bezahlbaren, umweltfreundlichen und sozialverträglichen Versorgung mit Rohstoffen für die Energiewende beitragen können.

Sichere Versorgung mit Metallen

Die Anzahl der Elemente, die für Produkte wie Autos, Verbraucherelektronik und die neuen Energietechnologien benötigt werden, steigt immer weiter an. Bei Innovationssprüngen oder starkem Wirtschaftswachstum steigt insbesondere die Nachfrage nach „Hightech-Metallen“ (zum Beispiel Gallium, Germanium, die Platingruppenelemente und Stahlveredler wie Nickel und Molybdän) entsprechend. Anders als auf anderen Märkten reagieren die Gewinnungskapazitäten auf solche Knappheiten und die damit verbundenen Preissignale eher träge, denn von der Entdeckung einer Metallagerstätte bis zum Start des Abbaus vergehen selbst bei günstigen politischen und administrativen Rahmenbedingungen im Schnitt etwa zehn Jahre.

Dabei wäre eine schnellere Ausweitung der Bergbaukapazitäten umso dringlicher, je geringer bereits gewonnene Vorräte dimensioniert sind. Die rohstoffverbrauchenden Unternehmen brauchen in der Regel ebenfalls erhebliche Zeit, um ihre Produktionsprozesse so anzupassen, dass ein knapper oder teurer Rohstoff sparsamer verwendet oder durch andere Rohstoffe ersetzt werden kann. Diese träge Dynamik war eine Ursache für die ungewöhnliche lange Hochpreisphase bei vielen Metallrohstoffen zwischen 2003 und 2013, die durch den Wirtschaftsboom in China ausgelöst worden war. Diese unerwartet hohe Nachfrage seitens vieler Marktteilnehmer führte nicht nur zu Preissprüngen, sondern stellenweise sogar zu Lieferengpässen und Betriebsstörungen in der

verarbeitenden Industrie. Darüber hinaus wird der Zugang zu wichtigen metallischen Rohstoffen am Weltmarkt in der Tendenz insgesamt zunehmend schwieriger, da immer weniger Länder und Unternehmen immer größere Anteile des Rohstoffangebots kontrollieren und sich somit auf diesen Märkten eine wachsende Machtkonzentration ergibt. Dadurch können einzelne Länder wie China durch Exportbeschränkungen die weltweite Verfügbarkeit von Rohstoffen erheblich einschränken.

Die Staaten reagieren unterschiedlich auf diese Herausforderung. Zunehmend betrachten sogar Regierungen marktorientierter und offener Volkswirtschaften wie etwa von Japan und Südkorea die Metalle als nahezu so wichtig wie Erdöl und Erdgas und betreiben eine strategische Rohstoffsicherungs politik. Die deutsche Bundesregierung hat ebenfalls auf die Zuspitzung der Versorgungssituation reagiert. Sie unterstützt die deutsche Wirtschaft im Rahmen ihrer nationalen Rohstoffstrategie von 2010 dabei, ihre Rohstoffquellen zu diversifizieren und damit der Monopolbildung bei den Rohstoffanbietern entgegenzuwirken. Grundsätzlich verlassen sich die rohstoffverarbeitenden Unternehmen hierzulande jedoch bereits seit den 1990er Jahren darauf, dass sie die Metalle auf dem Weltmarkt einkaufen können. Sollte es in den kommenden Jahren bei den Hightech-Metallen aber zu extremen Preissteigerungen oder gar Lieferengpässen kommen, so könnte dies die Umsetzung der Energiewende verzögern.

Folgende Maßnahmen könnten dazu beitragen, die Versorgung mit Metallen langfristig zu sichern:

- **Recycling:** Deutschland verfügt über große Vorkommen an vielen wertvollen Metallen in Form von Altprodukten wie Autos, Elektronikprodukten (unter anderem Mobiltelefonen) und Gebäuden, die weit stärker genutzt werden können.
- **Bergbau in Deutschland und Europa:** Potenziale für die Entdeckung neuer Lagerstätten in Deutschland und Europa sind vorhanden, sodass Indium, Germanium, Wolfram und Nickel aus inländischen Lagerstätten die Importabhängigkeit verringern könnten.
- **Rohstoffe aus dem Meer:** Werden die Lagerstätten in der Tiefsee erschlossen, könnten daraus langfristig viele für die Energiewende wichtige Metalle gewonnen werden.
- **Bezugsquellen diversifizieren:** Rohstoffverbrauchende Unternehmen können sich über Beteiligungen und langfristige Lieferverträge Zugang zu wichtigen Metallen sichern. Darüber hinaus könnte ein staatlich gefördertes Bergbauunternehmen Lagerstätten entwickeln und bestehende Bergwerke könnten mit staatlicher Hilfe Niedrigpreisphasen im „Stand-By-Modus“ überbrücken, um so einer weiteren Monopolbildung entgegenzuwirken. Aus wettbewerbsökonomischer Sicht werden solche Ansätze, in denen der Staat ein erhebliches unternehmerisches Risiko übernimmt, jedoch überwiegend kritisch gesehen.
- **Lagerhaltung:** Vorausschauende Bevorratung kann zeitlich begrenzte Lieferengpässe abfedern. Sollte dabei staatliche Unterstützung gewährt werden, muss die Privatindustrie – zum Beispiel durch eine Art Versicherungsprämie – an den Kosten angemessen beteiligt werden.
- **Rohstoffdaten:** Ein Lagerstättengesetz, das Unternehmen verpflichtet, bestimmte Daten, die sie im Rahmen ihrer Berichtspflichten bei den Bergbehörden abliefern müssen (wie zum Beispiel seismische Untersuchungsergebnisse oder Bohrdaten), nach einer Karenzzeit zu veröffentlichen, sowie eine internationale Vernetzung und ein

Informationsaustausch zu kritischen Metallen können zur Verfügbarkeit guter Rohstoffdaten beitragen.

- **Internationale Rohstoffpolitik:** Bilaterale Rohstoffabkommen können sowohl den Zugang zu Rohstoffen erleichtern als auch zu hohen Umwelt- und Sozialstandards beitragen. Für letzteres sind auch Transparenzmechanismen von großer Bedeutung.

Während zum Beispiel bei Stahl oder Kupfer schon heute ein großer Teil des Bedarfs aus **Recycling** gedeckt wird, sind die Wiedergewinnungsraten bei den Seltenen Erden und anderen Hightech-Metallen noch niedrig. Ein Grund dafür ist, dass diese Elemente in den einzelnen Produkten nur in kleinen Mengen vorkommen, und für ihre Wiedergewinnung aufwendige Spezialverfahren erforderlich sind. Zudem wird nur ein kleiner Teil der ausgemusterten Verbraucherelektronik einem leistungsfähigen Recycling zugeführt. Maßnahmen für mehr und effizienteres Metallrecycling können entlang der gesamten Prozesskette ansetzen: Die Abfallgesetzgebung könnte stärker auf die Wiedergewinnung von Hightech- und Sondermetallen ausgerichtet und die Anwendung effizienter Recyclingverfahren gesetzlich vorgeschrieben werden. Bessere Ausfuhrkontrollen verhindern illegale Exporte von Elektronikschrott. Verbraucherfreundliche Sammelsysteme würden verhindern, dass Elektronikgeräte im Hausmüll enden. Ein recyclingfähigeres Produktdesign würde es erleichtern, Bauteile mit wertvollen Elementen auszubauen und diese wiederzuverwerten oder einfacher zu recyceln.

Für Indium, Germanium, Wolfram, Lithium und Nickel gibt es **Potenziale in Deutschland**, die zu Neuentdeckungen führen können. Würden technische Verfahren zur Exploration (Suche nach und Erkundung von Rohstofflagerstätten) und metallurgischen Aufbereitung der Erze entwickelt, die auf die inländischen

Vorkommen abgestimmt sind, könnten sie eine kommerzielle Nutzung bekannter heimischer Metallerzlagerstätten wesentlich erleichtern. Hierzu wäre der Ausbau metallurgischer Forschungskapazitäten an den Universitäten notwendig.

Für viele der für die Energiewende potenziell kritischen Rohstoffe gibt es **marine Lagerstätten:** Kobalt, Nickel, Molybdän, Tellur, Indium und Selen. Für die technisch anspruchsvolle Förderung aus der Tiefsee ist allerdings weitere Forschung und Entwicklung erforderlich. Daher hat die Bundesregierung Erkundungslizenzen für zwei Gebiete von der internationalen Meeresbodenbehörde erworben und erforscht dort unter anderem die Umweltauswirkungen eines industriellen Abbaus. Andere Länder, darunter China, Japan und Russland, betreiben ebenfalls staatlich finanzierte Exploitation. Sollte die Bundesregierung entscheiden, dass die Metalle aus dem Meer künftig einen strategischen Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten sollen, müsste der Staat, nach heutigem Stand, den interessierten Unternehmen staatliche Unterstützung gewähren. Jedoch sind die Kosten für den Meeresbergbau hoch und schwer zu beziffern. Eine staatlich finanzierte Exploration würde daher ein erhebliches Kostenrisiko für den Steuerzahler mit sich bringen.

Ein frühzeitiges Engagement im Meeresbergbau würde es Deutschland ermöglichen, von Anfang an darauf hinzuwirken, dass weltweit hohe Umwelt- und Sicherheitsstandards für die Förderung mariner Rohstoffe eingeführt werden. Ein wichtiger Baustein in der Weiterentwicklung einer Strategie für den zukünftigen Meeresbergbau wäre ein sogenannter „Pilot-Mining-Test“, um den Abbau zu erproben, die Kosten besser einschätzen zu können und die damit in Zusammenhang stehenden Umweltauswirkungen zu erfassen.

Einen Teil der benötigten Metalle werden deutsche Unternehmen allerdings auf lange Sicht ohnehin am Weltmarkt beziehen müssen. Sicherer wird diese Versorgung durch eine **Diversifizierung der Bezugsquellen**. Zugang zu Elementen wie den Seltenen Erden, den Platingruppenmetallen, Wolfram oder Tantal können rohstoffverbrauchende Unternehmen in erster Linie sicherstellen, indem sie selbst Bergbau betreiben oder Beteiligungen an Rohstoffprojekten mit entsprechend langfristigen Lieferverträgen oder Vorkaufsrechten erwerben. Um dies zu erleichtern, könnte ein staatlich gefördertes Bergbau- oder Rohstoffunternehmen gegründet werden. Das Unternehmen könnte antizyklisch Lagerstättenrechte erwerben, Bergbauprojekte initiieren und Lagerstätten entwickeln und diese später in privatwirtschaftliche Lösungen überführen. Nachteilig wäre, dass der Staat ein erhebliches Investitionsrisiko einginge, ohne jegliche Garantie, dass sich die Privatwirtschaft tatsächlich engagiert. Alternativ könnte das geförderte Rohstoffunternehmen strategische Partnerschaften mit Produzenten von Rohstoffen und Zwischenprodukten schließen.

Um Niedrigpreisphasen zu überbrücken, wäre es auch möglich, Gruben zeitweilig mit staatlicher Unterstützung auf Care- und Maintenance-Basis – quasi im „Stand-By-Modus“ – aufrechtzuerhalten. Auf diese Weise könnten aus der Produktion genommene Bergwerke zu einem späteren Zeitpunkt schnell wieder betriebsbereit gemacht werden. Zeitlich begrenzte Hochpreisphasen wiederum können durch **Lagerhaltung** abgefedert werden. Eine staatlich organisierte Vorratshaltung für kritische Metalle – ähnlich der strategischen Erdölreserve – wäre eine Option, die Versorgung auch bei Lieferengpässen sicherzustellen. Eine angemessene Beteiligung der rohstoffverbrauchenden Industrie über eine Art Versicherungsprämie könnte sicherstellen, dass die Auswahl und Menge der vorzuhaltenden Rohstoffe bedarfsgerecht gesteuert wird.

Maßnahmen wie staatliche Beteiligungen an Bergbauunternehmen und Lagerhaltung, bei denen der Staat quasi zum Rohstoffunternehmer wird, sollten jedoch nur zum Einsatz kommen, wenn ein echtes Marktversagen vorliegt oder befürchtet werden muss. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ein Anbieter in einer Monopolstellung diese ausnutzt und Rohstoffe dadurch wesentlich teurer werden, als sie es in einem freien und transparenten Markt sein müssten. Ein Extremfall ist, wenn Rohstoffe physisch nicht mehr beschafft werden können, beispielsweise durch ein Exportverbot im wichtigsten Lieferland. Stark schwankende Rohstoffpreise hingegen stellen, wenngleich sie die rohstoffverbrauchenden Unternehmen vor große Herausforderungen stellen, an sich kein Marktversagen dar. Wird ein staatlicher Eingriff in Erwägung gezogen, muss daher sorgfältig geprüft werden, ob (1) tatsächlich ein Marktversagen vorliegt oder mit hinreichender Wahrscheinlichkeit bevorsteht, (2) die angedachten Maßnahmen geeignet sind, ein solches Versagen zu korrigieren und (3) die volkswirtschaftlichen Schäden, die bei einem Nichteingriff zu erwarten sind, die Kosten dieses Eingriffs rechtfertigen. Vorrang sollten jedoch Maßnahmen haben, die darauf abzielen, freie und transparente Märkte zu schaffen und Exportrestriktionen in den Lieferländern zu verhindern. Gelingt dies, so können die rohstoffverbrauchenden Unternehmen ihre Rohstoffversorgung eigenständig absichern. Nur wenn solche Maßnahmen – beispielsweise Handelsabkommen oder bi- und multilaterale Verträge – nicht greifen, kann eine direkte staatliche Beteiligung an der Rohstoffbeschaffung als Notfalllösung in Erwägung gezogen werden.

Um die Versorgungslage richtig einzuschätzen, brauchen Unternehmen gute **Rohstoffdaten**. Ein besonderes Informationsdefizit besteht bei den brechenden Hightech-Rohstoffen wie Indium, Germanium, Gallium, Tellur sowie den Seltenen Erden, die quasi als Neben-

produkte im Bergbau und der Verhüttung anderer Metalle gewonnen werden. Ihre Märkte sind sehr begrenzt und gleichzeitig sehr intransparent. Eine Vernetzung von Regierungen, Produzenten und Verbrauchern nach dem Modell der *International Metal Study Groups* unter dem Dach der Vereinten Nationen, wie es sie bereits für Blei, Zink, Kupfer und Nickel gibt, könnte dazu beitragen, dass die Märkte dieser Metalle transparenter werden.

Wären Unternehmen in Deutschland durch ein modernisiertes Lagerstättengesetz dazu verpflichtet, nach einer Karenzzeit diejenigen Daten über die Erkundung des tiefen Untergrundes zu veröffentlichen, die bei den Bergbehörden laut Auflagen bei der Konzessionsvergabe hinterlegt werden müssen, hätten Wirtschaft und Wissenschaft für die Entwicklung neuer Explorationsideen und -konzepte eine bessere Datenlage zur Verfügung. Zudem würden dadurch Doppelarbeit und damit Kosten vermieden. Außerdem wäre es wünschenswert, dass die Industrie nach einer Karenzzeit der Wissenschaft das Bohrkernmaterial zur Verfügung stellt.

Um schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu begrenzen, die gesellschaftliche Zustimmung zur Rohstoffgewinnung zu erhalten und einen fairen Wettbewerb auf den globalen Rohstoffmärkten zu ermöglichen, sind weltweit einheitliche, hohe Umwelt- und Sozialstandards – sowohl für den Bergbau als auch das Recycling – eine wichtige Voraussetzung. Auf globaler Ebene wurden in der Vergangenheit zahlreiche ordnungspolitische Optionen erwogen, wie mit Rohstoffen besser, gerechter und nachhaltiger umgegangen werden kann. Beispiele für Ansätze einer **internationalen Rohstoffpolitik** sind die Steuerung durch ein internationales Expertengremium oder die Einführung eines globalen Rohstoffrechts. Da die Interessen der beteiligten Länder jedoch sehr heterogen sind, sind globale Übereinkünfte schwer zu erreichen. Ein

praktikablerer Ansatz sind bilaterale Rohstoffabkommen und Rohstoffpartnerschaften. Sie sind schneller implementierbar und daher zumindest kurz- bis mittelfristig eher erfolgsversprechend.

Um Handels- und Produktionsprozesse offenzulegen, sind verbindliche Transparenzmechanismen ein geeignetes politisches Instrument. Gerade bei Rohstoffen aus Konfliktgebieten können sie die Verbindungen zwischen Unternehmen, Regierungen und bewaffneten Gruppen, die sich durch den Rohstoffabbau und -handel finanzieren, aufdecken und zu einem verantwortungsvolleren Rohstoffhandel führen. Auch Umwelt- und Sozialkriterien können und sollten in solchen Transparenzmechanismen berücksichtigt werden. Die „Social Licence to Operate“ zu erhalten, wird die größte Herausforderung in der Rohstoffgewinnung der Zukunft werden.

Energierohstoffe: Biomasse und Erdgas

Wenngleich künftig ein immer größer werdender Anteil des Energiebedarfs durch Strom aus Windkraft und Photovoltaik gedeckt werden wird, werden, zumindest bis Langzeitspeicher zur Verfügung stehen, weiterhin Brennstoffe benötigt. Biomasse ist gut speicherbar und kann für die Strom- und Wärmeerzeugung sowie nach Umwandlung in Bioalkohol, Biodiesel oder Biomethan als Kraftstoff im Verkehr flexibel eingesetzt werden. Vor- und Nachteile der Nutzung müssen allerdings gegeneinander abgewogen werden: So ist Biomasse nur begrenzt verfügbar, daher sollte sie dort eingesetzt werden, wo sie dem Energiesystem am meisten nützt.

Die Verwendung von Biomasse als Energiequelle ist nur unter bestimmten Umständen CO₂-neutral. Darüber hinaus verursacht der Anbau von Energiepflanzen in intensiver Landwirtschaft zusätzliche Treibhausgasemissionen (Lachgas) und

weitere Umweltbelastungen. Die gesamte Treibhausgasbilanz der Bioenergieverwendung ist von der Art der Pflanzen und des Bodens, der Art der Bewirtschaftung und insbesondere auch Änderungen der Landnutzung für den Anbau der Pflanzen abhängig und kann sich von Fall zu Fall stark unterscheiden. Ob der Einsatz von Bioenergie sinnvoll ist, hängt also auch davon ab, welche anderen Energieträger zur Verfügung stehen und wie sich die Treibhausgasbilanz und andere Umweltfolgen der Bioenergie im Einzelnen damit vergleichen. Da Biomasse sowohl in Deutschland angebaut werden als auch aus einer Vielzahl an Ländern importiert werden kann, kann sie einen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten.

Bei den fossilen Energieträgern kommt dem Erdgas für die Energiewende eine besondere Bedeutung zu: Gaskraftwerke sind flexibel und haben niedrige Investitionskosten und können daher die fluktuierende Einspeisung aus Wind- und Solarenergie gut ausgleichen. Zudem verursacht Gas pro erzeugter Kilowattstunde Strom weniger Kohlendioxid als Kohle.

Folgende Maßnahmen könnten dazu beitragen, die Versorgung mit Erdgas und nachhaltiger Bioenergie zu sichern:

Um den **Umweltfolgen des Bioenergieanbaus** entgegenzuwirken, bieten sich verschiedene Maßnahmen an. Ein erster Schritt wäre, die staatliche Förderung auf Abfallbiomasse und Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern zu beschränken. Deren Nutzung ist gegenüber Energiepflanzen in der Regel mit niedrigeren Treibhausgasemissionen und sonstigen Umweltfolgen verbunden. Eine sehr umfassende Option wäre, die Landwirtschaft in den Emissionshandel einzubeziehen – hierdurch könnten nicht nur die Treibhausgasemissionen des Energiepflanzenanbaus, sondern aller landwirtschaftlichen Produkte reduziert werden. Alternativ oder zusätzlich könnten Nachhaltigkeits-

vorgaben für den Energiepflanzenanbau und -import gemacht werden. Eine Steuer auf Düngemittel und ordnungsrechtliche Vorgaben zur Bewirtschaftung kohlenstoffreicher Böden (zum Beispiel Grünland und Moore) könnten neben den Treibhausgasemissionen auch weitere Umweltauswirkungen der Landwirtschaft reduzieren.

Zusätzliche Potenziale nachhaltiger Bioenergie ließen sich erschließen, indem Land, das für den Anbau von Nahrungspflanzen nicht geeignet ist, für den Anbau von Gräsern oder Gehölzen genutzt wird. Auch die energetische Nutzung von Abfall könnte erweitert werden. Die Flächen, die für den Anbau von Energiepflanzen verfügbar sind, sind keine feste Größe: Sie ließen sich erweitern, wenn weniger Lebensmittel verschwendet und der Konsum tierischer Produkte reduziert würde.

Bei **Erdgas** ist Deutschland fast vollständig von Importen aus einigen wenigen Lieferländern abhängig. Eine Möglichkeit etwaige Versorgungsengpässe zu überbrücken, ist der weitere Ausbau von Erdgasspeichern. Zu deren Bewirtschaftung wäre eine staatlich kontrollierte strategische Gasreserve denkbar, wie es sie auch für Erdöl gibt. Diese wäre allerdings mit hohen Kosten verbunden. Eine Diversifizierung der Lieferländer durch den Ausbau der Pipeline- und Flüssiggas-Infrastruktur sowie die Nutzung von Schiefergas und Erdgas aus Kohleflözen in Deutschland oder – langfristig – auch von Methanhydraten aus der Tiefsee sind weitere Möglichkeiten zur Sicherung der Versorgung.

1 Einleitung

Mit der Energiewende steht Deutschland in den kommenden Jahrzehnten ein großer Umbau der Infrastruktur bevor: Bis zum Jahr 2050 sollen sechzig Prozent der Primärenergie und achtzig Prozent der Elektrizität in Deutschland aus erneuerbaren Energien stammen.¹ Kohle- und Erdgaskraftwerke sollen weitgehend durch Windkraft- und Solaranlagen ersetzt werden, Benzin- und Dieselaautos durch Elektrofahrzeuge, intelligente Netze und steuerbare Lasten sollen dafür sorgen, dass Erzeugung, Speicherung und Verbrauch optimal aufeinander abgestimmt sind. Kurzum, das Energiesystem soll in einigen Jahrzehnten aus völlig anderen Anlagen bestehen und andere Energieformen nutzen als heute.

Wie wirkt sich das aber auf den Rohstoffbedarf aus? Am augenscheinlichsten ist hier natürlich der Rückgang des Verbrauchs der fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle. Die sinkende Abhängigkeit von diesen großteils aus dem Ausland importierten Energieträgern wird oft als ein positiver Effekt der Energiewende angeführt. Weniger Beachtung findet hingegen die Frage, welche Rohstoffe für die Errichtung des neuen Anlagenparks benötigt werden. Eine wichtige Rolle spielen hier Metalle.² Angesichts der Tatsache, dass der Rohstoffbedarf pro Energieeinheit der Errichtung von Erneuerbare-Energien-Anlagen höher sein wird als bei der Errichtung konventioneller Kraftwerke, ist also mit einem wachsenden Bedarf an Metallen für das Energiesystem zu rechnen. Neben Metallen werden für den Umbau der Infrastruktur Baurohstoffe wie Sand

oder Kies benötigt. Der Bedarf an diesen Rohstoffen wird in Deutschland aus der heimischen Produktion gedeckt. Sie sind im Grunde unbegrenzt verfügbar und für die Umsetzung der Energiewende unkritisch. Allerdings müssen bei ihrer Förderung und Verarbeitung Umweltaspekte wie Naturschutz oder Trinkwasserschutz und der Energiebedarf berücksichtigt und der Zugang sichergestellt werden.³

Wenngleich der Beitrag von Wind und Solarenergie zur Energieversorgung weiterhin rasant zunimmt, werden in den nächsten Jahrzehnten weiterhin Brennstoffe benötigt. Neben den fossilen Energieträgern kommt auch Biomasse als Kraftstoff sowie als Brennstoff zur Strom- und Wärmeerzeugung infrage.

Eine zuverlässige Versorgung mit den Metallen sowie den benötigten Energierohstoffen ist eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg der Energiewende. Diese Stellungnahme zeigt verschiedene Maßnahmen auf, die dazu beitragen können, die Versorgung mit Rohstoffen für die Energiewende möglichst sicher, bezahlbar, umweltfreundlich und sozialverträglich zu gestalten.

Eine detaillierte Analyse der volkswirtschaftlichen Kosten und Nutzen der einzelnen Maßnahmen sprengt den Rahmen dieser Stellungnahme. Insbesondere für diejenigen Maßnahmen, die mit tiefen Eingriffen in die Wirtschaft verbunden sind, wäre es daher ratsam, in folgenden Arbeiten Szenarioanalysen durchzuführen, um die volkswirtschaftlichen Effekte einzuschätzen.

¹ Bundesregierung 2010.

² Dazu gehören auch die Halbmetalle, die nach einer Konvention in der Rohstoffwirtschaft zu den Metallen hinzugezählt werden.

³ Angerer et al 2016, S. 103, 109.

2 Ausgangslage: Wichtige Fragen zur Rohstoffversorgung für die Energiewende

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die benötigten Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft und die wichtigsten Zusammenhänge auf den Rohstoffmärkten. Ausführlicher sind die aktuelle Versorgungssituation und die Entwicklungen auf den Rohstoffmärkten in der Analyse *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse*⁴ dargestellt.

2.1 Welche Metalle werden für die Energiewende benötigt?

Für die neuen Energietechnologien werden im Wesentlichen die gleichen Metalle benötigt wie für andere Hightech-Produkte. Eine wichtige Rolle spielen die sogenannten Technologie- und Sondermetalle wie beispielsweise Kupfer, Kobalt und Lithium, die Platingruppenelemente, Indium, Tellur, Gallium und Germanium sowie die Seltenen Erden.

Die **Platingruppenelemente** umfassen Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium. Sie spielen für Brennstoffzellen und die Wasserstoffelektrolyse – und damit für einige mögliche Schlüsseltechnologien der Energiewende wie wasserstoffbasierte Elektromobilität⁵, Langzeitspeicher und Power-to-Gas – eine wichtige Rolle. Zu den **Seltenen Erden** gehören unter anderem Yttrium, Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium, Europium, Cerium und Lanthan. Sie werden etwa für Batterien, Photovoltaikanlagen,

Windkraftanlagen, Motoren und Generatoren benötigt.

Generell wird die Rohstoffversorgung zunehmend komplex, da für die Herstellung von Hightech-Produkten immer mehr unterschiedliche Elemente benötigt werden. Besonders deutlich wird dieser Trend am Beispiel der Mikroprozessoren. Da diese heute in jeder Maschine und jedem Fahrzeug stecken und für die Mess- und Regeltechnik unverzichtbar sind,⁶ spielen sie auch beim Umbau der Energieversorgung einschließlich der intelligenten Vernetzung von Anlagen und Verbrauchern eine wichtige Rolle.

Insgesamt ist zu erwarten, dass der Bedarf an vielen Metallen in Zukunft stark zunimmt. So zeigt eine Abschätzung des Rohstoffbedarfs für 42 Zukunftstechnologien, dass im Jahr 2035 alleine für die betrachteten Technologien so viel Germanium, Kobalt, Scandium, Tantal und Neodym/Praseodym benötigt werden könnte, wie 2013 primär⁷ produziert wurde. Bei Lithium, Dysprosium/Terbium und Rhenium könnte der Bedarf 2035 sogar das Doppelte der Primärproduktion 2013 betragen.⁸

Die Energietechnologien sind dabei allerdings selten das wichtigste Einsatzgebiet eines Metalls. So werden zum Beispiel Permanentmagnete auf der Basis von Sel-

4 Angerer et al. 2016.

5 Wasserstoffbasierte Elektromobilität bezeichnet Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff betrieben werden.

6 Nach Angaben der Firma Intel steckten in einem Chip in den 1980er Jahren zwölf und in den 1990er Jahren 16 verschiedene Elemente. Seit den 2000er Jahren sind es mehr als sechzig Elemente (vgl. hierzu NRC 2007, S. 38, Abb. 2.3).

7 Primärproduktion ist die Produktion aus Bergbau. Das heißt, die Produktion aus Recycling ist nicht eingerechnet.

8 DERA 2016-1, S. 13.

tenen Erden zwar auch in Windturbinen (meist offshore) eingesetzt; das Hauptanwendungsgebiet dieser Magnete sind derzeit jedoch Elektromotoren und Festplatten⁹ in Computern und anderen Geräten. Da die verschiedenen Branchen am Markt um die Metalle konkurrieren, hängt deren Verfügbarkeit für das Energiesystem immer auch eng mit der Nachfrage anderer Industriezweige zusammen etwa der Automobilindustrie, der Elektronik und der Informations- und Kommunikationstechnologien.¹⁰ Viele der in dieser Stellungnahme vorgestellten Handlungsoptionen für metallische Rohstoffe adressieren daher die Versorgung mit Metallen im Allgemeinen.

2.2 Welche Energierohstoffe brauchen wir künftig noch?

Die Bedeutung der **fossilen Energierohstoffe** wird durch die Klimaschutzbemühungen und die wachsende Konkurrenz durch erneuerbare Energien langfristig zurückgehen. Allerdings müssen 2050 auch dann noch zwanzig Prozent des Strombedarfs und vierzig Prozent des gesamten Primärenergiebedarfs in Deutschland über Erdgas, Erdöl oder Kohle gedeckt werden, wenn die im Energiekonzept festgelegten Ziele erreicht werden.

Eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Energiewende könnte das **Erdgas** spielen: Pro Kilowattstunde bereitgestellter Energie verursacht der Energieträger weniger CO₂ als Kohle und Erdöl. Zudem sind Erdgaskraftwerke besonders flexibel und können daher gut die Schwankungen der Stromerzeugung aus Wind und Solarenergie ausgleichen.

Aus **Biomasse** wiederum lassen sich verschiedene Energieträger herstellen, die ähnliche Eigenschaften haben

wie Kohle, Öl und Gas. Bioenergie kann daher viele Funktionen im Energiesystem übernehmen: Holz als Festbrennstoff in Gebäudeheizungen und Heizkraftwerken, Biokraftstoffe im Verkehr und Biogas in allen Anwendungen, in denen heute Erdgas eingesetzt wird. Den Vorteilen stehen allerdings auch einige Nachteile gegenüber: So ist die Landfläche, die für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Energie benötigt wird, größer als bei Wind- und Solarenergie. Gleichzeitig entweichen mehr Treibhausgase. Zudem kann sich der Biomasseanbau negativ auf die Artenvielfalt und die Bodenqualität auswirken, während überschüssige Düngemittel Gewässer belasten. Angesichts knapper Anbauflächen konkurriert die Biomasseproduktion zudem teilweise mit der Nahrungs- und Futtermittelherstellung. Werden Wälder gerodet oder andere kohlenstoffreiche Ökosysteme (zum Beispiel Baumsavannen) in Agrarland umgewandelt, um Energiepflanzen anzubauen, schadet dies dem Klima. Dieser Effekt kann auch indirekt eintreten, wenn die Energiepflanzen den Anbau von Nahrungsmitteln verdrängen, und dann an anderer Stelle neue Agrarflächen für die Nahrungspflanzen erschlossen werden. Die in diesem Kontext dargestellten Handlungsoptionen zielen darauf ab, diese negativen Folgen der Bioenergienutzung möglichst gering zu halten.

2.3 Woher stammen die in Deutschland genutzten Rohstoffe?

Für **Metalle** gibt es zwei Quellen: Primärgewinnung durch Bergbau und Sekundärgewinnung durch Recycling. Da in Deutschland seit 1992 keine Metallerze mehr abgebaut werden, ist es darauf angewiesen, auf den globalen Rohstoffmärkten Primärrohstoffe oder metallhaltige Zwischenprodukte aus dem Ausland einzukaufen. Die aktuell einzige „heimische“ Metallquelle sind Sekundärlagerstätten, das heißt Rohstoffe aus Altprodukten wie Autos, Computern,

⁹ Durch die Verbreitung von Flash-Festplatten wird dieser Anwendungsbereich voraussichtlich bald zurückgehen.

¹⁰ Moss et al. 2013.

Gebäuden, Stromleitungen und potenziell auch Deponien. Um Basismetalle wie Eisen beziehungsweise Stahl, Kupfer, Zink oder Blei zu gewinnen, wird schon heute bevorzugt Schrott recycelt. Der Grund: Die Verarbeitung ist energie- und damit oft auch kostengünstiger als die Gewinnung von Primärerzen. Bei vielen Metallen, die für Hightech-Produkte benötigt werden, sind dagegen die Recyclingraten sehr gering und ist die Abhängigkeit von der globalen Nachfrage, den Weltmarktpreisen und Exportländern entsprechend höher.

Auch bei den **Energierohstoffen** ist die Importabhängigkeit Deutschlands sehr hoch. So müssen 98 Prozent des Erdöls und 88 Prozent des Erdgases eingeführt werden.¹¹ Auch Steinkohle wird bereits zu einem großen Teil importiert. Nach Beendigung der Subventionen im Jahr 2018 wird der Abbau deutscher Steinkohle eingestellt werden, sodass sich die Importabhängigkeit weiter erhöhen wird. Selbst die in Deutschland verbrauchte Biomasse

stammt zu zwanzig Prozent aus Importen. Lediglich den Braunkohlebedarf kann Deutschland aus Quellen im eigenen Land decken.

Die globale Entwicklung von Rohstoffangebot und -nachfrage sind somit entscheidend für die Versorgungssicherheit. Könnte Deutschland sich von den Importen unabhängiger machen, würde dies zu einer sichereren und nachhaltigeren Rohstoffversorgung beitragen. Dies gilt umso mehr, als derzeit ein Großteil der Importe der zahlreichen wirtschaftsstrategischen¹² Rohstoffe aus jeweils nur wenigen meist außereuropäischen Drittländern stammt, zu denen es keine kurzfristigen Alternativen gibt.¹³

¹² Wirtschaftsstrategische Rohstoffe sind solche, deren Verfügbarkeit für Zukunftstechnologien gesichert werden muss und die eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben. Ein relativ geringer Mengeneinsatz dieser Rohstoffe trägt zu einer hohen zusätzlichen Wertschöpfung in Hochtechnologiebereichen bei. Hierzu gehören zum Beispiel die Seltene-Erden-Elemente, Elektronikelemente wie Gallium, Indium, Germanium, die Platingruppenelemente oder Stahlveredler wie beispielsweise Molybdän, Nickel oder Niob.

¹³ EC 2014-5, S. 8 f.; DERA 2016-2.

¹¹ BGR 2015-1, S. 17.

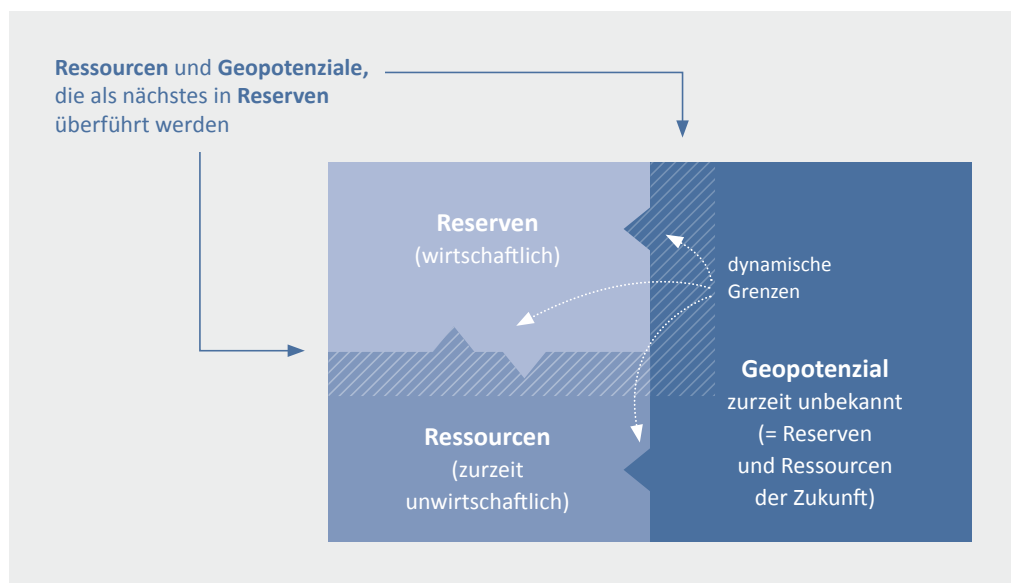


Abbildung 1: Rohstoffbox. Die Grenzen zwischen Geopotenzialen, Ressourcen und Reserven sind fließend, da durch Exploration, Fortschritte in der Förder- und Aufbereitungstechnik sowie steigende Marktpreise unbekannte Vorkommen entdeckt und in wirtschaftlich förderbare Reserven umgewandelt werden.¹⁴

¹⁴ Übersetzt und modifiziert nach Scholz et al. 2014.

2.4 Sind die primären Rohstoffvorkommen bald erschöpft?

Bei den Primärrohstoffen unterscheidet man, wie in Abbildung dargestellt, zwischen Reserven, Ressourcen und Geopotenzialen. Die Grenzen dazwischen sind fließend und stellen immer nur eine Momentaufnahme in einem dynamischen System dar. Denn durch Explorationsaktivitäten werden neue Rohstoffvorkommen entdeckt, das heißt Geopotenziale werden in Ressourcen oder Reserven umgewandelt. Innovationen im Bereich der Förder- und Aufbereitungstechnik sowie – bei wachsender Nachfrage – steigende Rohstoffpreise führen dazu, dass bislang unwirtschaftliche Ressourcen zu wirtschaftlich abbaubaren Reserven werden. Typischerweise wachsen daher die Reserven mit dem Verbrauch mit.

Bei den Metallen bietet neben den geologischen Lagerstätten auch das Recycling ein erhebliches Potenzial.¹⁵ Die Steinkohle- und Braunkohlevorkommen sind so groß, dass selbst bei weltweit steigendem Verbrauch bis auf Weiteres ausreichende Mengen verfügbar sein dürften. Im Vergleich dazu sind Erdöl und Erdgas knappere Rohstoffe. Daran ändert auch die zunehmende Förderung von Schieferöl und Schiefergas in den USA nichts, die für den derzeitigen Preisverfall bei Erdgas und Erdöl mitverantwortlich ist. Dennoch ist aus geologischer Sicht bis 2050 insgesamt kein Mangel an Energierohstoffen zu erwarten.¹⁶ Obwohl niemand genau weiß, wie viele Rohstoffe insgesamt als Geopotenziale im Boden vorhanden sind, ist auf Basis des heutigen geologischen Wissens dennoch davon auszugehen, dass es bis 2050 und darüber hinaus trotz steigender globaler Nachfrage ausreichend Metalle und Energierohstoffe gibt, um die Energie-

wende in Deutschland umzusetzen.¹⁷ Eine dauerhafte Knappheit tritt am ehesten bei Bioenergie auf, da die Menge an Bioenergie, die auf der begrenzten verfügbaren Landfläche mit vertretbaren Umweltfolgen angebaut werden kann, sich nicht wesentlich steigern lässt.¹⁸

Um abzuschätzen, ob die vorhandenen Rohstoffe den Bedarf decken können, wird in manchen Studien die „statische Reichweite“ als Indikator verwendet: Er wird errechnet, indem die Reserven oder Ressourcen durch den jährlichen Verbrauch geteilt werden. Das Ergebnis wird dann interpretiert als die Anzahl der Jahre, für die der Rohstoff noch ausreicht. Diese Interpretation lässt jedoch die Dynamik der Entwicklung von Ressourcen zu Reserven außer Acht und ist somit irreführend. Allerdings kann das Verhältnis von Reserven zum jährlichen Verbrauch als ein langfristiges Warnsignal für die Versorgungssituation verwendet werden: Sinkt es unter einen Wert von zehn Jahren, also die typische Vorlaufzeit zur Erschließung neuer Lagerstätten und Errichtung neuer Bergwerke, so kann das darauf hindeuten, dass nicht schnell genug neue Reserven entwickelt werden, um die wachsende Nachfrage zu decken. Dies kann zu Lieferrisiken und Preissprüngen führen.

Eine Voraussetzung, damit Bergbauunternehmen aus dem Geopotenzialfeld Reserven entwickeln können (Abbildung 1), sind ausreichende Basisinformationen wie geowissenschaftliche Karten oder Lagerstättenmodelle als Grundlage für eine kommerzielle Exploration. Diese zur Verfügung zu stellen, ist Aufgabe der staatlichen Geologischen Dienste und Forschungsinstitutionen. Um auch in Zukunft die Dynamik der erfolgreichen Exploration aufrechtzuerhalten, sind weiter anhaltende Erkundungs-

¹⁵ Angerer et al. 2016.

¹⁶ Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sieht lediglich beim Erdöl eine mögliche Limitierung, vgl. BGR 2015-1.

¹⁷ Angerer et al. 2016.

¹⁸ Angerer et al. 2016, Leopoldina 2013.

arbeiten der staatlichen Geologischen Dienste im In- und Ausland im Vorfeld der Industrie sowie Forschungsanstrengungen auf hohem Niveau erforderlich.

2.5 Welche Rolle kann Metall-Recycling spielen?

Eine intensive Nutzung der Sekundärlagerstätten trüge dazu bei, die Abhängigkeit von Metallimporten zu verringern. Anders als Energierohstoffe werden Metalle nicht verbraucht, sondern gebraucht. Das heißt: In der Regel können Metalle aus Sekundärmaterialien in der gleichen Qualität gewonnen werden wie aus Primärquellen (eine Ausnahme ist zum Beispiel Aluminium). Die Vorteile: Der Energiebedarf des Recyclings ist oft niedriger als bei der Primärgewinnung.¹⁹ Zudem sind Vorlaufzeiten sowie Investitionsbedarf in der Regel geringer als bei Bergbauprojekten. Darüber hinaus findet Metall-Recycling mehr gesellschaftliche Akzeptanz²⁰ und reduziert Abfallmengen.²¹

Die Effizienz der Wiedergewinnung hängt von der gesamten Prozesskette ab: Sammeln, Demontage, Aufbereitung und metallurgische Verarbeitung. Bislang werden hohe Recyclingraten nur bei Haupt- und Edelmetallen²² erreicht.²³ Bei den Seltenen Erden und den Hightech- und Sondermetallen wie Indium, Germanium, Gallium, Tellur, Kobalt oder Lithium sind sie hingegen noch unzureichend. Diese Elemente

kommen in den einzelnen Produkten oft in nur kleinen Mengen und in komplexer Zusammensetzung mit anderen Elementen vor, die Wiedergewinnung ist entsprechend aufwendig. Die Ursprungselemente lassen sich nur mithilfe von Spezialverfahren von ihren Produkten trennen und wieder zu Feinmetallen raffinieren.²⁴

Während es auch für diese Metalle bei einfachen Rückständen (zum Beispiel Produktionsausschuss) und bestimmten Materialkombinationen etablierte Recyclingverfahren gibt, liegt die Herausforderung in der Regel bei komplexen „Multimetall“-Produkten. Hier ist die metallurgische Infrastruktur zur Gewinnung der Metalle noch nicht so gut ausgebaut, beziehungsweise es sind noch keine geeigneten Technologien verfügbar. Bei vielen dieser für die Energietechnologien der Zukunft so wichtigen Metalle kommt es allerdings bereits beim Sammeln zu hohen Verlusten. So wird Verbraucherelektronik nur zu einem geringen Teil einem leistungsfähigen Recycling zugeführt. Um höhere Recyclingraten zu erreichen, müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein: Verfügbarkeit und Nutzung effektiver Technologien, ein ausreichend hohes Preisniveau für Metalle, recyclingfördernde Gesetze und eine gute logistische Infrastruktur, um die Altprodukte zu sammeln.

Allerdings: Auch wenn die Recyclingquoten vieler Metalle erheblich gesteigert werden können, kann Recycling alleine den Bedarf an metallischen Rohstoffen nicht decken. Zum einen wäre ein hundertprozentiges Recycling energetisch unmöglich und auch nicht sinnvoll. Zum anderen können die Metalle erst am Ende der Produktlebenszeit wiedergewonnen

19 Das Recycling von reinen Metallen verbraucht immer weniger Energie als die Primärgewinnung. Je niedriger jedoch die Konzentration des gewünschten Metalls und je komplexer die Zusammensetzung des Produktes sind, desto energieintensiver ist die Wiedergewinnung.

20 Angerer et al. 2016.

21 BGR 2015-2, S. 21 f.

22 Hauptmetalle sind Eisen/Stahl, Stahlveredler, Buntmetalle wie Kupfer, Blei, Zink sowie die Leichtmetalle Aluminium und Magnesium. Edelmetalle sind Silber, Gold und die Platingruppenmetalle.

23 In Deutschland wurden 2014 etwa 53 Prozent des Aluminiums, etwa 42 Prozent des Kupfers und etwa 45 Prozent des Rohstahls in der Raffinade- und Rohstahlproduktion aus sekundären Rohstoffen gewonnen (BGR 2015-2, S. 22).

24 Angerer et al. 2016.

werden. Diese reicht von wenigen Jahren (zum Beispiel bei Mobiltelefonen und Fahrzeugen) bis zu mehreren Jahrzehnten (beispielsweise bei Gebäudeinfrastrukturen). Bei steigendem Rohstoffbedarf ist die in den Altprodukten vorhandene Menge also selbst bei vollständiger Wiedergewinnung nicht ausreichend. Der Import von Primärrohstoffen ist daher heute und auch bis zum Jahre 2050 unumgänglich.²⁵ Für den Beitrag des Recyclings zur Versorgungssicherheit in Deutschland ist zudem zu berücksichtigen, dass die importierten Rohstoffe in Form hochwertiger Produkte reexportiert werden. Damit gehen die verarbeiteten Rohstoffe dem Recycling in Deutschland verloren. Außerdem werden auch Recycling-Rohstoffe auf einem globalen Markt gehandelt. Metalle, die in Deutschland gesammelt werden, tragen daher nicht unbedingt dazu bei, den Bedarf in Deutschland zu decken.

2.6 Wie entwickeln sich Versorgungssicherheit und Rohstoffpreise?

Da aus geologischer Sicht genügend Rohstoffe vorhanden sind, ist letztlich entscheidend, ob am Markt **ausreichend Rohstoffe zu wettbewerbsfähigen Preisen** verfügbar sind. Darauf haben neben der Dynamik von Angebot und Nachfrage an den Märkten auch die Struktur der Bergbauwirtschaft und die strategische Rohstoffpolitik der Lieferländer Einfluss.

2.6.1 Die Dynamik der globalen Märkte

In der Regel reagieren die Rohstoffmärkte flexibel auf Änderungen bei Angebot und Nachfrage: Steigt etwa der Preis eines Rohstoffs, weil er knapper wird, wächst auch

das Angebot, denn bei höheren Preisen können auch schwieriger zugängliche oder weniger reichhaltige Vorkommen rentabel abgebaut werden. Außerdem setzen hohe Preise Anreize für mehr Exploration und die Entwicklung neuer Förder- und Aufbereitungstechnologien, mit denen neue Rohstoffvorkommen erschlossen werden können. Unternehmen wiederum bemühen sich bei Knappheiten und hohen Preisen, den betroffenen Rohstoff effizienter und damit sparsamer zu verwenden oder gar zu ersetzen (Substitution). Das Zusammenspiel dieser Marktmechanismen wird auch als Regelkreis der Rohstoffversorgung²⁶ bezeichnet. Dieser Regelkreis hat in den vergangenen hundert Jahren dafür gesorgt, dass sich die realen Preise der meisten Rohstoffe im Durchschnitt kaum erhöht haben.

Die Vorlaufzeiten im Bergbau sind allerdings sehr lang: Von der Entdeckung einer Lagerstätte bis zum Start des Abbaus vergehen im Schnitt je nach den politischen und administrativen Rahmenbedingungen etwa zehn bis zwanzig Jahre. Hinkt das Angebot der wachsenden Nachfrage hinterher, weil Investitionen in Technik und Transportkapazitäten nicht rechtzeitig getätigt wurden, entstehen vorübergehend Preisspitzen und gegebenenfalls auch Lieferengpässe. Schon kleine Nachfrageanstiege um wenige Prozent irgendwo auf der Welt können zu so großen Preissprüngen führen, dass die Versorgung in Deutschland beeinträchtigt wird.²⁷

²⁶ Wellmer/Hagelüken 2015.

²⁷ Selbst wenn keine reale Knappheit vorhanden ist, können Befürchtungen des Marktes vor einer vermeintlichen Verknappung zu rasanten Preisanstiegen führen, wie zum Beispiel bei den Seltenen Erden zwischen 2010 und 2011 (Angerer et al. 2016).

²⁵ Angerer et al. 2016, Box IV.

Kurz- und langfristige Trends auf den Rohstoffmärkten

Für kurzfristige Versorgungsengpässe bei Rohstoffen gibt es eine Reihe von Indikatoren und Warnsignalen, anhand derer sich die Marktentwicklung bis zu etwa fünf Jahre im Voraus abschätzen lässt:

- die Marktpreise
- die Lagerbestände an den Börsen²⁸
- die Auslastung von Bergwerken, Hütten und Raffinerien
- Entwicklung der Bergbau- und Hüttenkapazitäten (Bergbau- und Hüttenprojekte, die sich in der Planung oder im Aufbau befinden im Vergleich zu aus der Produktion gehenden Kapazitäten)
- Konzentrationstrends bei den Anbietern (Lieferländer und Bergbauunternehmen)
- geostrategische Risiken (Länderrisiken)
- technologische Innovationen (Zum Beispiel kann der unerwartete Markteintritt von Zukunftstechnologien²⁹ die Nachfrage nach bestimmten Metallen plötzlich steigern. Durch neue Förder- und Aufbereitungstechnologien³⁰ können zuvor nicht nutzbare Lagerstätten erschlossen und damit das Angebot erhöht werden.)

Viele Maßnahmen zur Sicherung der Versorgung, etwa der Ausbau von Bergbau- oder Recyclingkapazitäten, haben allerdings einen wesentlich längeren Vorlauf als fünf Jahre. Auch die Entwicklung von Technologien, die einen sparsameren Einsatz eines knappen Rohstoffs in Produkten ermöglichen, dauert in der Regel mehrere Jahre. Langfristige Lieferverträge zu günstigen Preisen wiederum lassen sich nur in Zeiten ausreichender Versorgung abschließen.

Langfristig kann die Rohstoffversorgung daher nur durch antizyklische Maßnahmen und Strategien gesichert werden, die sich nicht an den kurzfristigen Preisschwankungen der Rohstoffmärkte orientieren. Indikatoren für langfristige Entwicklungen bei der Rohstoffversorgung sind:

- das Verhältnis Reserven/Verbrauch
- Analysen früherer Rohstoffzyklen, um die Ursachen und die Dauer von Hoch- und Niedrigpreisphasen bestimmter Rohstoffe besser zu verstehen
- Szenarien für die langfristige Entwicklung von Angebot und Nachfrage, zum Beispiel basierend auf der wirtschaftlichen Entwicklung verschiedener Länder, oder für Technologietrends wie die Energiewende

Solche globalen volkswirtschaftlichen Indikatoren liefern jedoch in der Regel wenig Anreize für langfristige Maßnahmen zur Rohstoffsicherung. Bei einem so umfassenden Infrastrukturwandel wie der Energiewende ist daher ein gesellschaftlicher Dialog darüber erforderlich, inwieweit der Staat Verantwortung für die Sicherung der Rohstoffversorgung übernehmen sollte.

²⁸ Über die London Metal Exchange (LME), die weltweit wichtigste Börse für Rohstoffgeschäfte, werden Rohstoffe gehandelt, die in mehr als sechshundert von der LME zertifizierten Warenhäusern gelagert werden. An der LME werden hauptsächlich Massenmetalle (unter anderem Aluminium, Kupfer) gehandelt.

²⁹ Beispielsweise vollzog sich der Wechsel von Röhren- zu LCD-Fernsehern innerhalb von nur zwei Jahren. Statt Barium und Strontium waren plötzlich Indium und Zinn die entscheidenden Elemente (Angerer et al. 2016, Kapitel 3.3.2).

³⁰ Durch Erfindung des Imperial-Smelting-Verfahrens in den 1950er Jahren wurde es möglich, Blei-Zink-Mischkonzentrate zu verhütten. Damit wurden Lagerstätten, in denen Blei und Zink so feinverwachsen sind, dass sie in der Aufbereitung nicht getrennt werden konnten, plötzlich bauwürdig.

Kurz- und mittelfristig betrachtet sind die Rohstoffmärkte daher selten im völligen Gleichgewicht und bewegen sich zwischen Käufer- und Verkäufermärkten³¹ sowie Hoch- und Niedrigpreiszyklen. So löste der Nachfrageboom in China zwischen 2003 und 2013 bei vielen Metallrohstoffen eine ungewöhnlich lange Hochpreisphase aus. Die unerwartet hohe Nachfrage seitens vieler Marktteilnehmer hatte extreme Auswirkungen: Neben wenig beherrschbaren Preissteigerungen kam es auch zu Lieferengpässen, die zu Betriebsstörungen in der verarbeitenden Industrie führten. Bestehende Lieferkontrakte wurden storniert, und begrenzte Frachtkapazitäten im internationalen Seehandel führten zu langen Lieferzeiten und extremen Frachtpreisen für Rohstoffe.

In der Rückschau wurde der Nachfrageanstieg im Zuge des enormen Wirtschaftswachstums in China allerdings überschätzt und führte zu einer globalen Überproduktion. Die derzeitige Niedrigpreisphase³² ist eine Folge davon. Gleichzeitig ist fraglich, ob das Nachfragewachstum Chinas mittelfristig weiterhin so hoch sein wird wie in der Vergangenheit.³³ Sollten allerdings andere bevölkerungsreiche Schwellen- und Entwicklungsländer wie Indien, Indonesien oder Brasilien dem Entwicklungspfad Chinas folgen, könnte der globale Rohstoffbedarf auch über das Jahr 2050 hinaus noch weiter steigen.³⁴

Das Preisgeschehen auf den Rohstoffmärkten wird auch durch reine Spekulationsgeschäfte beeinflusst. Vorwärtsverkäufe und Absicherungsgeschäfte, die als Schutzmechanismen für die Realwirtschaft durchaus positiv wirken, bieten andererseits auch Möglichkeiten für reine Spekulationsgeschäfte. Welche Rolle letztere bei der Preisbildung spielen, wird kontrovers diskutiert. Hier besteht Analyse- und möglicherweise auch Regulierungsbedarf. Dominante, preistreibende Spekulationsgeschäfte würden einen gesellschaftspolitisch unerwünschten Wohlstandstransfer herbeiführen, weil die Konsumenten mehr für Rohstoffe aufwenden müssen, als ihrem realen Gegenwert entspricht.

2.6.2 Wann Rohstoffe „kritisch“ sind

Ein wichtiges Kriterium für die Rohstoffsicherheit ist die Zuverlässigkeit der Lieferländer. Indikatoren sind etwa deren politische Stabilität, die Korruptionskontrolle und die Leistungsfähigkeit der öffentlichen Hand. Besonders groß sind die Risiken, wenn ein Rohstoff zu einem großen Teil aus wenigen Lieferländern mit niedriger Zuverlässigkeit stammt (gewichtetes Länderrisiko). Bei Rohstoffen mit hohen Liefer Risiken bei gleichzeitig großer Bedeutung für die Wirtschaft (zum Beispiel, weil sie in wichtigen Produkten oder Prozessen nicht durch andere Rohstoffe ersetzt werden können) spricht man von kritischen Rohstoffen.³⁵ Nach einer Studie der Europäischen Kommission vom Mai 2014 zählen dazu momentan zwanzig Rohstoffe.³⁶

Auch wenn ein Rohstoff nur noch von sehr wenigen Unternehmen angeboten wird und diese damit quasi in einer Monopolstellung sind, kann der Rohstoff

31 Ein Käufermarkt ist ein Markt, in dem der Käufer den Markt bestimmt, also ein Überschuss herrscht, und der Käufer also die Preise drücken kann. In einem Verkäufermarkt besteht Knappheit und der Verkäufer kann die Preise in die Höhe treiben.

32 Stand April 2016.

33 Während bis Ende des vergangenen Jahrtausends siebzig bis achtzig Prozent des Rohstoffeinsatzes auf die alten Industrieländer entfielen, ist seit etwa 2003 bei fast allen wesentlichen Rohstoffen mit Ausnahme von Erdöl und Erdgas China der größte Konsument. Der Anteil Chinas am weltweiten Verbrauch stieg beispielsweise von 1990 bis 2012 bei Stahl, Kupfer und Aluminium von unter zehn auf über vierzig Prozent (Angerer et al. 2016, Kapitel 3.3.1).

34 Angerer et al. 2016.

35 Angerer et al. 2016, Kapitel 2.3.

36 Antimon, Beryllium, Borate, Chrom, Kobalt, Koks, Kohle, Fluorit, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Magnesit, Magnesium, Niobium, Platinmetalle, Phosphate, Leichte Seltene Erden, Schwere Seltene Erden, Silizium und Wolfram (vgl. EC 2014-5, S. 4). In der Vorgängerstudie der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2010 wurden lediglich 14 kritische Rohstoffe gelistet, wobei Tantal zwar 2010 als kritisch angesehen wurde, aber nicht mehr 2014.

als potenziell kritisch eingestuft werden. Beispielsweise beträgt der Anteil der drei jeweils größten Produzenten für Niob 93 Prozent, für Palladium 72 Prozent und für Platin 63 Prozent.³⁷ Bei Beryllium kontrolliert ein einziger Anbieter in den USA 92 Prozent des Marktes.

Welche Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten kritisch werden, hängt zum einen von den zukünftigen technologischen Entwicklungen im Energiesektor und zum anderen von den Rohstoffmärkten ab. Auch technologische Entwicklungen in anderen Sektoren, die mit dem Energiesektor um Rohstoffe konkurrieren, spielen eine Rolle. Die Annahmen dazu, wie sich die Rohstoffnachfrage entwickelt, beeinflussen die Bewertung ebenso wie die zur Bewertung der Kritikalität angewandte Methode, sodass verschiedene Kritikalitätsstudien zu einzelnen Rohstoffen teilweise zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen.

Große Übereinstimmung zeigt sich bei den **Seltenen Erden, den Platingruppenelementen sowie den Sondermetallen Indium und Tellur**. Diese Elemente werden in fast allen aktuellen Studien als kritisch oder nahezu kritisch beurteilt.³⁸ Bei den Seltenen Erden ist die Länderkonzentration mit mehr als 86 Prozent der Weltbergwerksproduktion in einem Land (China) besonders hoch.³⁹ Auch die Platingruppenmetalle werden in nur wenigen Ländern abgebaut: Mehr als 68 Prozent des Platins kommen aus Südafrika, rund 75 Prozent des Palladiums stammt aus Russland und Südafrika.⁴⁰ Bei anderen Elementen ist die Bewertung nicht so eindeutig. So werden Nickel, der Stahlveredler

Niob, das Refraktärmetall⁴¹ Wolfram, Gallium, Germanium, Selen, Vanadium, Silber, Graphit, Rhenium und Hafnium von einem Teil der Rohstoffstudien als kritisch oder nahezu kritisch eingestuft, von anderen als unkritisch. Bei den Elementen **Kupfer** und **Lithium**, die bei den erneuerbaren Energien eine große Rolle spielen, drohen keine Versorgungsengpässe.⁴² Zwar könnte der Bedarf an Lithium für Zukunftstechnologien wie Elektrofahrzeuge und Lithium-Ionen-Batterien bis 2035 auf das Vierfache der Primärproduktion des Jahres 2013 anwachsen.⁴³ Produktionssteigerungen dieser Größenordnung innerhalb von zwanzig Jahren sind aber in der Vergangenheit bereits gelungen: So verfünffachte sich beispielsweise die Produktion von Kobalt und Indium von 1993 bis 2013.⁴⁴ Daher besteht kein Grund zu der Annahme, dass die Rohstoffmärkte nicht in der Lage sein werden, auf die steigende Lithiumnachfrage zu reagieren und den wachsenden Bedarf zu decken. Bei den Rohstoffen Phosphat⁴⁵ und Helium⁴⁶ hingegen besteht besonderer Beobachtungsbedarf.⁴⁷

Einige der für die Energiewende benötigten Metalle, zum Beispiel die Elektronikelemente Indium, Germanium oder Gallium sind **beibrechende Rohstoffe**⁴⁸, das heißt, sie werden als Nebenprodukt

37 DERA 2014.

38 Auch die Autoren der Analyse Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft (Angerer et al. 2016), die der vorliegenden Stellungnahme als Grundlage dient, betrachten diese Rohstoffe als potenziell kritisch.

39 USGS 2015, S. 129; siehe auch DERA 2014.

40 USGS 2015, S. 121; siehe auch DERA 2014.

41 Metalle mit relativ hoher Korrosionsbeständigkeit (bei Raumtemperatur), einem hohen Schmelzpunkt und hoher elektrischer Leitfähigkeit.

42 Zu diesem Ergebnis kommen die Autoren der Analyse *Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft* (Angerer et al. 2016) nach kritischer Würdigung auch von Modellen und Studien, die Kupfer und/oder Lithium als potenziell kritisch bewerten.

43 DERA 2016, S. 14.

44 DERA 2016, S. 293.

45 Phosphat ein nicht zu substituierbarer Rohstoff, der als Düngemittel unersetzbar für den Pflanzenwuchs und damit für die Ernährung ist.

46 Helium ist ein möglicher essenzieller Rohstoff für zukünftige Energietechnologien.

47 Angerer et al. 2016.

48 Beibrechende Elemente sind an einen anderen Hauptwertstoff (Primärrohstoff) gebunden. Eine Trennung der Elemente ist oftmals nur unter sehr hohem Energieaufwand möglich. Die Gewinnung eines beibrechenden Elements ist somit zwangsläufig an die Gewinnung des Primärrohstoffs gekoppelt. Sie werden daher von Rohstoffen unterschieden, die eigenständig in Lagerstätten auftreten.

im Bergbau eines anderen Metalls gewonnen. Bei diesen Metallen funktioniert der Regelkreis der Rohstoffversorgung nur eingeschränkt, da die produzierte Menge des beibrechenden Metalls an die Förderung des Hauptmetalls gekoppelt ist und ein Produzent in der Regel letztere nicht wegen einer Knappheit des beibrechenden Metalls erhöhen wird. Zudem gibt es oft nur wenige Produzenten und Abnehmer, wodurch der Markt weniger transparent ist als bei Rohstoffen, die über große Börsen gehandelt werden. Daher ist auch die künftige Verfügbarkeit schwer einzuschätzen.

2.7 Strategische Rohstoffpolitik: Welche Rolle kann der Staat spielen?

Die geologische und geografische Verteilung der Lagerstätten und die Strukturen der Bergbauwirtschaft begünstigen Konzentrationstrends. Das heißt, immer mehr Rohstoffvorkommen gehören immer weniger Firmen in immer weniger Förderländern. Es besteht eine Tendenz zur Bildung von Oligopolen oder sogar Monopolen. Dies ermöglicht es einzelnen Unternehmen oder Ländern, zum Beispiel durch Exportbeschränkungen, den Rohstoffmarkt sehr stark zu beeinflussen. Die daraus resultierenden Handels- und Wettbewerbsverzerrungen werden zunehmend zur Herausforderung im Hinblick auf die Rohstoffsicherheit.⁴⁹

Ein Beispiel ist die Abhängigkeit von China bei den Seltenen Erden: Als die Regierung ab 2010 deren Exportquoten beschränkte, löste sie damit einen massiven Preisanstieg aus. Hinzu kommt die Technologieführerschaft der chinesischen Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette (quasi „von der Mine zum Magnet bis zum MacBook“). So kontrolliert China auch 75 Prozent des Marktes für ent-

sprechende Fertigprodukte⁵⁰ (beispielsweise Permanentmagnete⁵¹). Auch in der aktuellen Niedrigpreisphase gibt es kaum Konkurrenz zum chinesischen Monopol bei Seltenen Erden – ein Zustand, der sich spürbar auf das Wirtschaftswachstum und die Technologieführerschaft Deutschlands und Europas auswirken könnte.

Im Zusammenspiel mit dem Ansatz, westlichen Volkswirtschaften die Rohstoff-sicherung der Privatwirtschaft zu überlassen, ermöglichte es das staatskapitalistische Modell China, seine marktbeherrschende Position am Seltene-Erden-Markt strategisch immer weiter auszubauen, bis hin zu einer nahezu Monopolstellung. Das daraus resultierende Versorgungsrisiko kann die rohstoffverbrauchende Industrie in westlichen Ländern kaum alleine überwinden, denn die eher kurzfristigen Zeithorizonte der Unternehmen und Investoren (ein bis fünf Jahre) verhindern strategische Investitionen in den Aufbau einer alternativen Wertschöpfungskette für Seltene-Erden-Produkte.⁵²

Ein Handelskonflikt zwischen China und Japan 2010 hat sogar die Befürchtung ausgelöst, dass Seltene Erden in zukünftigen Konflikten als ökonomisches und politisches Druckmittel gegen andere Länder verwendet werden könnten.⁵³ Zwar haben westliche Regierungen in Reaktion auf die Preisspitze von 2010/2011 versucht, durch erhöhte Forschungsanstrengungen, internationale Diplomatie und eine Beschwerde bei der Welthandelsorganisation die Struktur des Seltene-Erden-Marktes zu verändern – bisher allerdings mit mäßigem Erfolg.⁵⁴

⁵⁰ Angerer et al. 2016.

⁵¹ Permanent- beziehungsweise Dauermagnete haben eine hohe magnetische Energiedichte und sind stärker als herkömmliche Ferritmagnete. Sie kommen beispielsweise in elektrischen Generatoren und Lautsprechern zum Einsatz.

⁵² Klossek et al. 2016.

⁵³ Klossek et al. 2016.

⁵⁴ Klossek et al. 2016.

⁴⁹ BDI 2015.

Bei einigen Metallen, beispielsweise Eisen (Stahl), hat China in den letzten Jahren massive Überkapazitäten aufgebaut. Diese werden vom chinesischen Staat subventioniert, um die Produktion und damit Arbeitsplätze im Land erhalten zu können. Dadurch wird jedoch gleichzeitig die europäische Stahlindustrie massiv bedroht, weshalb die EU im Februar dieses Jahres ein offizielles Anti-Dumping-Verfahren gegen die Billigimporte eröffnet hat.

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen zu wettbewerbsfähigen Preisen ist also – trotz ausreichender geologischer Rohstoffpotenziale – nicht immer garantiert. Obwohl es erst einmal Aufgabe der Industrie selbst ist, Schutzkonzepte⁵⁵ und Ausweichstrategien zur Rohstoffsicherung zu entwickeln, kann der Staat hier einen entscheidenden Beitrag leisten. Ähnlich wie Öl und Gas werden in immer mehr Staaten Metalle als schützenswerte strategische Ressourcen betrachtet. Ein Blick in andere Länder zeigt, dass dies nicht nur für staatskapitalistisch geführte Staaten wie China, Russland oder die arabischen Länder gilt. Auch die demokratisch legitimierte Regierungen in vergleichsweise marktorientierten und offenen Volkswirtschaften wie Japan und Südkorea betreiben eine **strategische Rohstoffsicherungspolitik**. So sichert die Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) zusammen mit dem Staat und der Wirtschaft weltweit Rohstoffe für die japanische Industrie.⁵⁶

Außerdem betreibt sie bei bestimmten kritischen Rohstoffen eine strategische Lagerhaltung (Stockpiling), um die japanische Wirtschaft vor Lieferunterbrechungen und Preisschwankungen zu schützen.

Nun stellt sich die Frage, ob es für Deutschland sinnvoll wäre, das staatliche Engagement in der Rohstoffsicherung auszuweiten. Hierbei ist zunächst zwischen zwei Ansätzen zu unterscheiden: Zum einen kann der Staat sich auf politischer Ebene für weltweit offenere und transparentere Märkte einsetzen, indem (beispielsweise über Handelsabkommen) Rahmenbedingungen geschaffen werden, die für die Unternehmen den Zugang zu Rohstoffen erleichtern. Von besonderer Bedeutung ist es dabei, Exportbeschränkungen in den Lieferländern zu verhindern. Zum anderen kann der Staat selber in der Rohstoffwirtschaft aktiv werden (beispielsweise durch staatliche Lagerhaltung oder staatliche Beteiligung an einem Bergbauunternehmen).

Staatliche Eingriffe in die Privatwirtschaft benötigen, neben parlamentarischer Kontrolle, eine minimale Legitimation in Form einer Abwägung der Wohlfahrtsverluste durch den Nichteingriff im Vergleich zu den Kosten durch den Eingriff. Wird ein staatlicher Eingriff in Erwägung gezogen, muss daher geprüft werden, (1) ob ein Marktversagen vorliegt oder mit hinreichender Wahrscheinlichkeit bevorsteht, (2) ob die angedachten Maßnahmen geeignet sind, ein solches Versagen zu korrigieren, und (3) ob die Eingriffskosten den Wohlfahrtsverlust kompensieren.

Grundsätzlich bringen Märkte Angebot und Nachfrage nach einem Produkt zu einem bestimmten Preis zusammen. Ein hoher Preis wird aus einer Übernachfrage im Verhältnis zum Angebot beziehungsweise aus einem Unterangebot relativ zur Nachfrage resultieren. Ob das relativ zu niedrige Angebot durch ein antizyklisches Investitionsverhalten ausgelöst wurde

55 Ein wichtiger Aspekt dabei ist, nachteilige Auswirkungen von auftretenden Knappheiten und Preisspitzen möglichst gut abfedern zu können (Resilienz). In einer Analyse des Akademienprojekts werden Maßnahmen vorgestellt, die Resilienz gegenüber Versorgungsengpässen mit Platingruppenmetallen und Erdgas zu erhöhen (vgl. Renn 2017).

56 Die JOGMEC gehört zum Zuständigkeitsbereich des Ministeriums für Wirtschaft, Handel und Industrie und stellt japanischen Unternehmen finanzielle Mittel für die Exploration und Entwicklung von Rohstoffprojekten zur Verfügung. Weiterhin übernimmt sie Haftungsgarantien bei risikoreichen Projekten und bietet den Unternehmen auch technische Unterstützung bei der Rohstoffentwicklung an (vgl. JOGMEC 2015).

oder andere Gründe vorliegen, spielt hierbei keine Rolle. Solange das Produkt zu einem Preis gekauft oder verkauft werden kann, ist der Markt an sich funktionsfähig. Hohe Schwankungen der Preisänderungen (Volatilität) zeugen von einer hohen Unsicherheit bezüglich der Preisfindung und stellen die Marktteilnehmer, insbesondere solche mit Interesse an dem physischen Produkt im Gegensatz zu spekulativen Marktteilnehmern, vor besondere Herausforderungen. Solange jedoch auch bei hoher Volatilität Handel stattfindet, kann nicht von einem Marktversagen ausgegangen werden.

Ein Marktversagen⁵⁷ liegt hingegen vor, wenn einzelne Anbieter aufgrund einer Monopolstellung Marktmacht ausüben und Rohstoffe dadurch wesentlich teurer werden, als sie in einem freien und transparenten Markt sein müssten. Ein Extremfall liegt vor, wenn Produkte physisch nicht mehr beschafft werden können. Ein physischer Lieferengpass kann beispielsweise durch politische Änderungen hervorgerufen werden. Exemplarisch sei das Exportverbot von Rohstoffen durch Indonesien oder die Philippinen in jüngster Vergangenheit genannt.⁵⁸ In einem solchen Fall sind die zu erwartenden volkswirtschaftlichen Kosten durch den Produktionsstopp hoch und ein staatlicher Eingriff könnte gerechtfertigt sein.

2.8 Welche Risiken birgt die Rohstoffgewinnung für Mensch und Umwelt?

Umwelt- und Sozialstandards im Bergbau unterscheiden sich von Land zu Land erheblich. Entsprechend unterschiedlich sind auch die Auswirkungen auf Mensch und Natur. So ist der Bergbau in Industrieländern, der nach dem Stand der Technik durchgeführt wird, sicher: In der deutschen rohstoffgewinnenden Industrie ereignen sich durchschnittlich weniger Unfälle als in der Gesamtheit der gewerblichen Wirtschaft.⁵⁹ In vielen Entwicklungsländern sind die Arbeitssicherheitsstandards hingegen niedrig. Besonders gefährlich und gesundheitsschädlich ist oft die Arbeit im Kleinbergbau, in dem die Erzförderung und -aufbereitung manuell und nur mit einfachsten Techniken stattfindet. Auch profitiert die lokale Bevölkerung nicht immer wirtschaftlich von den Bergbauaktivitäten in ihrer Nachbarschaft. Stattdessen entstehen oft Inseln wirtschaftlicher Aktivität, die soziale Unterschiede in der Bevölkerung zementieren oder gar vergrößern, ohne sich positiv auf die Gesamtentwicklung einer Region oder eines Landes auszuwirken.⁶⁰

Darüber hinaus verursacht der Bergbau in Entwicklungs- und Schwellenländern, insbesondere der Kleinbergbau, oft gravierende Umweltschäden, die auch mit erheblichen Gesundheitsrisiken verbunden sind. Wenn Gruben- und Abwasser aus der Erzaufbereitung nicht fachgerecht gelagert und aufbereitet wird, vergiften Schwermetalle und andere Schadstoffe Böden und Gewässer. Schwere Gesundheitsschäden verursacht beispielsweise der Einsatz von Quecksilber zur Aufbereitung des Erzes im Gold-Kleinbergbau.⁶¹ Durch die hohe Anzahl individueller Betreiber im einfachen Kleinbergbau ist die Überwachung und Durchsetzung von Umweltvorschriften

57 Es gibt verschiedene Definitionen für Marktversagen. Ein allokatives Marktversagen entsprechend der neoklassischen Theorie der Volkswirtschaftslehre liegt bereits vor, wenn die Allokation knapper Ressourcen vom vollkommenen Modellmarkt abweicht. Ein Zusammenbruch des Marktes, der dazu führt, dass Rohstoffe physisch nicht mehr beschafft werden können, stellt eine besonders schwere Form eines Marktversagens dar.

58 Mining Journal 2016.

59 DGUV 2000-2012; DGUV 2014.

60 Misereor 2013.

61 MPI/BGR 2016, S. 90 ff.

gerade in abgelegenen Regionen besonders schwierig. Zudem sind häufig weder Betreiber noch Arbeiter fachgerecht ausgebildet.⁶²

Ein großes Problem sind auch Bergwerke, die nach Ende ihrer wirtschaftlichen Nutzung nicht ordnungsgemäß rückgebaut, sondern einfach verlassen werden. Hier können noch über viele Jahre saure und metallhaltige Grubenwässer die Umwelt schädigen.⁶³

Obwohl der Bergbau in Industrieländern heutzutage weitaus geringere Umweltschäden verursacht und nur einen zeitlich begrenzten Eingriff in die Natur darstellt, kommt es auch hier zuweilen zu Unfällen. Besonders schwerwiegend sind etwa Dammbürche an Becken zur Lagerung der Aufbereitungsrückstände.⁶⁴ Bei der Förderung von Energierohstoffen gehören verunglückte Öltanker und explodierte Bohrinnseln wie die Deepwater Horizon im Jahr 2010 zu den folgenschwersten Unfällen.⁶⁵ Insgesamt hat sich jedoch die Menge an Öl, die durch solche Unglücke ins Meer gelangt, seit den 1970er Jahren um den Faktor 15 verringert.⁶⁶ Der praktische Betrieb der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung wirkt sich ebenfalls auf die Umwelt aus. Um große Förderanlagen wie Braunkohletagebaue zu betreiben oder Ölsand abzubauen, muss großflächig in

Landschaften und Ökosysteme eingegriffen werden. Auch Schadstoffe gelangen in gewissem Umfang in die Umwelt: So wurden beispielsweise in Gewässern in der Nähe von Ölsandförderstätten in Kanada bei 13 Schadstoffen, darunter Quecksilber, Blei und Cadmium, höhere Werte gemessen als in weiter entfernten Gewässern. Bei sieben dieser Stoffe waren die Richtwerte zum Schutz von Wasserlebewesen überschritten.⁶⁷

Bei der Weiterverarbeitung von Seltenen-Erden-Erzen wiederum fallen giftige Abfälle und radioaktive Substanzen an, die gegen ein Versickern in Boden und Grundwasser gesichert werden müssen. Mountain Pass, das einzige aktive Seltene-Erden-Bergwerk in den USA, wurde 2002 unter anderem wegen negativer Umweltauswirkungen geschlossen. Toxische und radioaktive Abwässer waren ins Grundwasser gelangt und potenziell gesundheitsschädliche Konzentrationen von Seltenen Erden sowie Radionukliden waren im Boden und in der Luft nachgewiesen worden. Zudem hatte der hohe Wasserverbrauch den Grundwasserspiegel absenken lassen. Nach umfangreichen Sanierungsmaßnahmen konnte das Bergwerk 2010 wieder in Betrieb genommen werden. Durch eine bessere Abfallbehandlung soll das Austreten schädlicher Substanzen in Zukunft verhindert werden. Zudem konnte der Wasserverbrauch durch einen Wiedergewinnungsprozess um neunzig Prozent reduziert werden.⁶⁸

Der oft hohe Wasserverbrauch ist eine weitere Herausforderung im Zusammenhang mit der Rohstoffgewinnung: Da viele Förderstätten in trockenen Gebieten liegen, fehlt das verbrauchte Wasser dann in der Landwirtschaft oder für die Trinkwasserversorgung.⁶⁹

62 MPI/BGR 2016, S. 89.

63 MPI/BGR 2016, S. 73.

64 So brach 2010 in einem Aluminiumwerk im ungarischen Ajka der Damm eines Deponiebeckens. Drei Dörfer und eine Fläche von etwa vierzig Quadratkilometern wurden mit schwermetallhaltigem Rot-schlamm überschwemmt, zehn Menschen starben und 150 wurden verletzt (vgl. MPI/BGR 2016, S. 59 ff.).

65 Die Explosion der Bohrplattform Deepwater Horizon im Golf von Mexiko mit elf toten und 16 schwerverletzten Arbeitern war der schwerste Ölunfall aller Zeiten. 700.000 Liter Rohöl gelangten ins Meer, mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Ökosysteme und die lokale Fischerei. Ein US-Expertenkomitee kam 2011 zu dem Schluss, dass eine Reihe technischer Mängel und Fehlentscheidungen in der Summe zu dem Unglück geführt haben, und dass in der Tiefsee-ölförderung erhebliche Verbesserungen notwendig sind. In der Folge wurden von mehreren Ölkonzernen gemeinsam Notfallpläne ausgearbeitet, die in Zukunft solche schweren Unfälle verhindern sollen (vgl. World Ocean Review 2014, S. 38 ff.).

66 World Ocean Review 2014, S. 39.

67 Kelly et al. 2009.

68 2015 wurde das Bergwerk allerdings wegen eingebrochener Preise der Seltenen Erden wieder stillgelegt (vgl. adelphi 2015).

69 MPI/BGR 2016, S. 52.

Schutz der Menschenrechte im Bergbau

Menschenrechtsverletzungen kamen in der Vergangenheit im Bergbausektor häufiger vor als in allen anderen Branchen.⁷⁰ Besonders in den frühen Projektphasen besteht ein hohes Risiko, dass beeinträchtigte Gruppen übergangen werden. Wichtig ist daher, dass die betroffene Bevölkerung bereits vor Beginn aller Aktivitäten informiert und in die Planung einbezogen wird und Projekte nur mit ihrer Zustimmung begonnen werden. Während der Errichtung von Bergwerken oder Tagebauen werden Menschenrechte besonders häufig im Zuge von Umsiedlungen verletzt. Während des eigentlichen Betriebs dominieren Menschenrechtsverletzungen durch Umwelt- und Gesundheitsbeeinträchtigungen, die durch die Förder- und Aufbereitungsprozesse verursacht werden (zum Beispiel Verseuchung von Boden und Wasser mit Schadstoffen).

Konventionen zur Gewährleistung der Menschenrechte bei der Rohstoffförderung existieren bereits. Handlungsbedarf besteht vor allem bei ihrer Durchsetzung. Auch wenn die Menschenrechtsverletzungen meist außerhalb Deutschlands stattfinden, kann die Politik mittelbaren Einfluss im Sinne eines umwelt- und sozialverträglichen Bergbaus ausüben. So wird beispielsweise bei der Ausgestaltung neuerer Rohstoffabkommen der Bundesregierung der Schutz der Menschenrechte inzwischen berücksichtigt.⁷¹ Jedes Land hat zudem die Möglichkeit, Richtlinien für das globale Verhalten seiner heimischen Firmen vorzugeben und sie zur Einhaltung dieser Regelungen zu verpflichten. Es ist daher zu begrüßen, dass das Bundeskabinett am 21. Dezember 2016 einen nationalen Aktionsplan *Wirtschaft und Menschenrechte*, der die Leitprinzipien⁷² der UN umsetzt, verabschiedet hat.⁷³

70 UN (2008), zitiert in (MPI/BGR 2016, S. 17), ordnet etwa 28 Prozent aller Menschenrechtsverstöße durch Firmen dem Rohstoffsektor zu.

71 In den Rohstoffabkommen der Bundesregierung mit Kasachstan (Bundesregierung 2012) und der Mongolei (Bundesregierung 2011) wird die Umsetzung von Umwelt- und Sozialstandards bei der Rohstoffgewinnung als Schwerpunkt ausgewiesen, aber der Begriff „Menschenrechte“ fehlt vollständig. In den Abkommen mit Chile (Bundesregierung 2013) und Peru (Bundesregierung 2014-1) werden Menschenrechte thematisiert, wobei Peru sogar besondere Versicherungen bezüglich eingeborener Völker abgibt.

72 DGCN 2014.

73 Auswärtiges Amt 2016.

Zusammenfassend gilt: Die meisten der schwerwiegenden Umwelt- und Gesundheitsschäden des Bergbaus wären vermeidbar, wenn die beste verfügbare Technik⁷⁴ zum Einsatz käme. Nimmt man jedoch hohe Schadstoffemissionen und niedrige Sozialstandards in Kauf, lassen sich Wertstoffe deutlich günstiger produzieren. Einheitliche globale Umwelt- und Sozialstandards sind daher wichtig, um eine Verlagerung der Produktion in Länder mit niedrigen Standards zu verhindern.

Zudem wächst der Protest der betroffenen Bevölkerung gegen negative Umwelt- und Sozialfolgen des Bergbaus. Somit stehen die Unternehmen immer

häufiger vor der Herausforderung, die gesellschaftliche Zustimmung für Bergbauprojekte („Social License to Operate“) zu erhalten. Es liegt also auch im unmittelbaren Interesse der Rohstoffindustrie, die negativen Bergbaufolgen zu minimieren. Jedes Bergbauunternehmen sollte daher während der Laufzeit ausreichend finanzielle Ressourcen allokalieren, um Rehabilitierungsmaßnahmen am Ende der Laufzeit zu finanzieren und auf diese Weise negative Bergbaufolgen möglichst gering zu halten.

Dennoch bleiben Eingriffe in Landschaft und Ökosysteme bei Bergbauprojekten unvermeidbar. Der gesellschaftliche Dialog um die Legitimation eines Projektes erfordert daher ein Abwägen des Nutzens der Rohstoffgewinnung gegen die negativen Folgen.

74 Im internationalen Bergbau als Best Available Technology, kurz BAT, bezeichnet.

3 Handlungsoptionen: Metallische Rohstoffe

Auch wenn die Metallpreise derzeit niedrig sind, sind trotzdem langfristige Strategien zur Rohstoffsicherung erforderlich. Im Folgenden werden zunächst Maßnahmen für metallische Rohstoffe vorgestellt und hinsichtlich ihrer Effektivität, Realisierbarkeit und Kosten diskutiert. Vor- und Nachteile sowie die Rolle der jeweils verantwortlichen Akteure (vor allem Industrie und Staat) werden dargestellt. Die Optionen umfassen bereits bestehende sowie neue Instrumente, die einzeln oder komplementär umgesetzt werden können.

3.1 Expertise und Wissenstransfer

Um möglichst flexibel auf Schwankungen an den Rohstoffmärkten reagieren zu können, benötigen Unternehmen gute und verlässliche Daten. In staatlichem Auftrag stellen die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)⁷⁵, die zugehörige Deutsche Rohstoffagentur (DERA) sowie die Geologischen Dienste der Bundesländer⁷⁶ Informationen zu geologischen sowie rohstoffökonomischen und -ökologischen Fragen bereit.

Als Basis für die Rohstoffpolitik und Raumordnungspolitik werden von den Geologischen Diensten grundlegende Informationen über Rohstoffpotenziale erstellt, um Gebiete zu identifizieren, in denen prinzipiell Lagerstätten liegen könnten. Geologische Karten zur Lage und Tiefe

von Bodenschätzen in einzelnen Ländern können auch der Rohstoffindustrie etwa als Grundlage für eigene Erkundungen⁷⁷ dienen und damit die Explorationskosten senken. Globale ökonomische Aspekte werden im Rohstoff-Monitoring der DERA analysiert.⁷⁸ Dazu gehören ein Screening von Preis-, Angebots- und Nachfrageentwicklungen. Analysiert werden Preisentwicklungen, Länderrisiken⁷⁹ sowie Angebotskonzentrationen auf den Märkten, Zwischenprodukte und Wertschöpfungsketten sowie der Bedarf für Schlüssel- und Zukunftstechnologien. In Detailanalysen erstellt die DERA Rohstoffrisikoanalysen für einzelne Rohstoffe und diskutiert diese Ergebnisse mit relevanten Vertretern der Wirtschaft.

Für das Zusammenspiel von staatlichen Informationsstellen und rohstoffverbrauchenden Unternehmen ist Rohstoffexpertise auf beiden Seiten erforderlich – bei den staatlichen Einrichtungen, um die Informationen zu erstellen und in der Industrie, um die Auswirkungen auf die Versorgungssituation des eigenen Unternehmens richtig zu interpretieren und darauf reagieren zu können.

⁷⁵ Die BGR ist in Deutschland der nationale geologische Dienst. Organisatorisch ist sie eine Behörde im Geschäftsbereich des Bundeswirtschaftsministeriums.

⁷⁶ Zum Aufgabenspektrum der Geologischen Dienste der Bundesländer gehört unter anderem das Erstellen, Aufbereiten und Archivieren geowissenschaftlicher Fachinformationen über die Beschaffenheit des Bodens und der im Untergrund befindlichen Rohstoffe.

⁷⁷ Die geologischen Vorerkundungen der BGR in der Nordsee in den Jahren 1957 bis 1964 legten beispielsweise den Grundstein für die spätere kommerzielle Exploration der dortigen Öl- und Gasvorkommen.

⁷⁸ Die Deutsche Rohstoffagentur in der BGR hat ein Ampelsystem für fünf Kriterien entwickelt: augenblickliche Angebots- und Nachfragesituation (Marktbalance, Lagersituation, Kapazitätsausnutzungsgrad im Bergbau und bei Hütten/Raffinerien), Produktionskosten, geostrategische Risiken (Länderkonzentrationen und -risiko), Marktmacht (Firmenkonzentration), Trends bei Angebot und Nachfrage (projizierte Marktbalance in fünf Jahren, Grad der Exploration, geplante Investitionen).

⁷⁹ Vgl. Abschnitt 2.6.2.

3.1.1 Offenlegungspflicht für geologische Daten

Das deutsche Lagerstättengesetz erlaubt es den Firmen, die Daten über die Erkundung des tiefen Untergrundes dauerhaft verschlossen zu halten. Wertvolle geologische Informationen liegen weitgehend ungenutzt in den Archiven. Ein **modernes Lagerstättengesetz** (wie etwa in Norwegen, Schweden, Finnland, Serbien, den Niederlanden, Kanada, Australien und Neuseeland), dem zufolge alle Daten (nach einer Karenzzeit) öffentlich gemacht werden müssen, könnte volkswirtschaftlich von hohem Nutzen sein. Von einer optimalen Datenlage aus könnten Wissenschaft und Industrie neue Explorationsideen und -konzepte entwickeln. Dies wäre für eine zukunftsorientierte wissenschaftliche Auswertung auch im Hinblick auf die Nutzung des geologischen Untergrundes durch künftige Generationen von großem Nutzen. Die Aufsuchungs- und Gewinnungsaktivitäten haben erfahrungsgemäß in den oben genannten Ländern durch eine solche Gesetzgebung nicht gelitten.

3.1.2 Internationale Vernetzung

Derzeit sammelt und verwaltet jeder Staat Informationen über die globalen Rohstoffvorkommen. Durch eine stärkere internationale Vernetzung könnten Synergien erzeugt und Kosten gespart werden. Ein erster erfolgreicher Schritt ist etwa das Projekt *Minerals4EU*⁸⁰: Es wurde im Rahmen der Rohstoffinitiative der EU⁸¹ auf den Weg gebracht und wird derzeit von 17 Geologischen Diensten in Europa unterstützt mit dem Ziel, ein **europäisches Wissensnetzwerk** aufzubauen. So soll eine Online-Plattform ausgebaut und weiterentwickelt werden, auf der Datensätze zur Rohstoffversorgung in Europa zusammengeführt und nach einheitlichen

Standards aufbereitet werden. Ein jährlich aktualisiertes *European Minerals Yearbook* soll ein umfassendes Lagebild für Europa zeichnen. Regelmäßige Analysen sollen politische, ökonomische und technologische Entwicklungen sowie langfristige Markttrends auf den Rohstoffmärkten zusammenfassen und als Entscheidungsgrundlage für Politik und Industrie dienen.

Da das Projekt bereits erfolgreich angelaufen ist, könnte es relativ schnell und zu geringen Kosten weiterentwickelt werden, um Europas Wissensbasis im Hinblick auf wichtige Rohstoffe dauerhaft zu stärken. Die notwendigen Strukturen sind mit **EuroGeoSurveys**, der Gemeinschaft aller europäischen Dienste, bereits vorhanden. EuroGeoSurveys wurde 1995 gegründet, um die EU und die Regierungen der Mitgliedsstaaten zu beraten. Das Ergebnis wäre eine bessere und regelmäßige Erstellung eines *European Minerals Yearbook* (vergleichbar dem Standardwerk *Mineral Commodity Summaries* des United States Geological Survey) und anderer Analysen. Sinnvoll wäre eine Umstellung der Finanzierung von der EU-Projektförderung auf eine institutionelle Regelförderung mit regelmäßiger Evaluierung.

Auch auf nationaler Ebene könnte eine **Zusammenführung der Datenbasen**, die von den **verschiedenen Landesämtern** unterhalten werden, die Verfügbarkeit der Daten verbessern. Wichtig ist dies insbesondere für grenzüberschreitende Lagerstättenprobleme.

Die Informationsbereitstellung zu den beibehaltenen wirtschaftsstrategischen Hightech-Metallen wie zum Beispiel Indium, Germanium, Gallium, Tellur, aber auch den Seltenen Erden ist mit besonderen Herausforderungen verbunden: Diese Märkte sind sehr begrenzt und gleichzeitig sehr intransparent. Hier könnte das Modell

⁸⁰ Minerals4EU 2016.

⁸¹ Durch die Rohstoffinitiative der EU sollen der freie Zugang zu Rohstoffvorkommen in Drittländern, eine nachhaltige Versorgung mit Rohstoffen aus europäischen Quellen sowie Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft gefördert werden, vgl. EC 2016-1.

der International Metal Study Groups⁸² Abhilfe leisten. Diese mit Vertretern von Regierungen, Produzenten und Verbrauchern besetzten Arbeitsgruppen arbeiten unter dem Dach der Vereinten Nationen und haben bereits dafür gesorgt, dass die Märkte einiger Metalle transparenter geworden sind. Auf europäischer Ebene könnte das durch die EU-Kommission initiierte *European Rare Earths Competency Network*⁸³ für Seltene Erden eine Ausgangsbasis bilden, die auf weitere Hightech-Metalle ausgeweitet werden könnte. Ob der in Aussicht stehende Nutzen einer Study Group für Hightech-Metalle attraktiv genug wäre, damit ausreichend viele Produzenten und rohstoffverarbeitende Unternehmen aktiv teilnahmen und Informationen beizubringen, müsste ein Praxistest zeigen.⁸⁴

3.1.3 Rohstoffexpertise in Deutschland stärken

Eine wichtige Rolle für Erhalt und Erweiterung von Rohstoffexpertise spielen die Universitäten und Forschungsinstitute. In den 1990er Jahren herrschte die Einschätzung vor, dass sich der Rohstoffbedarf langfristig problemlos über die internationalen Märkte decken lassen würde. In der Folge wurden auch die Ausbildungs- und Forschungskapazitäten in den relevanten Geo- und Ingenieurwissenschaften sehr stark reduziert.

Um die eigene Versorgungssituation stärker aktiv zu gestalten, ist Rohstoffexpertise erforderlich. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine Stärkung des deutschen und europäischen Bergbaus und der Metallverarbeitung bei einigen kritischen Metallrohstoffen, wie in Abschnitt Diver-

sifizierte Bezugsquellen diskutiert. Eine **Wiederbelebung der Forschungs- und Ausbildungskapazitäten** in Deutschland würde dazu beitragen, diese Expertise zu erhalten und auszubauen. Die Gründung des Helmholtz-Instituts für Ressourcentechnologien Freiberg im Jahr 2011 im Zuge der nationalen Rohstoffstrategie und die Einrichtung der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie waren hierfür ein erster Anfang. Diese beiden außeruniversitären Forschungseinrichtungen haben sich bereits erfolgreich mit den wichtigsten universitären Kompetenzträgern an der RWTH Aachen, TU Clausthal und TU Bergakademie Freiberg vernetzt. Dieses Netzwerk, welches unter dem Namen German Resource Research Institute (GERRI) firmiert, soll dazu dienen, Synergien zu realisieren. Dies gilt insbesondere für die erfolgreiche Partizipation in der von der EU finanzierten und im Jahr 2015 gegründeten Knowledge and Innovation Community EIT Raw Materials, welche das Ziel hat, Innovationen und Ausbildung im europäischen Rohstoffsektor nachhaltig zu stärken.

Während es für das Themenfeld Exploration derzeit ausreichend Lehrkapazitäten gibt, die es zu erhalten gilt, zeichnet sich ein Defizit im Bereich der Aufbereitung und metallurgischen Verarbeitung (einschließlich Bioleaching) von Metallrohstoffen sowie bei der Rohstoffwirtschaft ab.

Darüber hinaus wäre es auch denkbar, die **Expertise der Geologischen Dienste** der Bundesländer zu stärken. Momentan werden dort vor allem geowissenschaftliche und bodenkundliche Fachinformationen gesammelt, aufbereitet und archiviert. Die Geologischen Dienste der Bundesländer beraten jedoch auch die Bergämter bei der Vergabe von Bergbauberechtigungen an nationale und internationale Bergbauunternehmen. Damit die Dienste auf fundierter Grundlage entscheiden können, benötigen sie die

⁸² Study Groups gibt es bereits für Blei Zink, Kupfer und Nickel. Sie arbeiten gewinnorientiert, sowohl die Mitarbeit als auch die Beratungsprodukte sind kostenpflichtig. Die deutschen Beiträge für die Mitgliedschaft der BGR für das Jahr 2013 beliefen sich je Study Group auf circa 15.000 bis 27.000 Euro, vgl. BMWi 2015-1.

⁸³ ERECON 2015.

⁸⁴ Statt eine Study Group für Hightech-Metalle neu zu gründen, wäre auch eine institutionelle Anknüpfung an die bestehende Struktur der Internationalen Study Groups mit Sitz in Lissabon denkbar.

entsprechende rohstoffwirtschaftliche Expertise und insbesondere Kenntnis der internationalen Entwicklungen auf den Rohstoffmärkten.

3.2 Versorgungssicherheit

Die Abhängigkeit von wenigen Lieferländern lässt sich reduzieren, indem inländische Rohstoffquellen stärker genutzt werden. Auch eine Diversifizierung der Lieferländer kann die Versorgungssicherheit erhöhen.

3.2.1 Recycling

Weil Deutschland über umfangreiche Sekundärlagerstätten aus Altmetall verfügt, kann ein umfassendes und effizientes Recycling ein wichtiger Baustein für eine nachhaltigere und sicherere Versorgung mit metallischen Rohstoffen für die Energiewende sein. Um die Recyclingraten bei bestimmten Metallen zu verbessern, müssen neben den technischen Verfahren auch Gesetzgebung, Logistik und Konsumentenverhalten in den Blick genommen werden. Nur mit einem umfassenden Ansatz, der gleichermaßen ökonomische und verbraucherfreundliche Anreize für Unternehmen⁸⁵ und Konsumenten setzt und logistisch gut organisiert ist, können mehr wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen werden als es heute der Fall ist. Kurz: Das Recycling von Metallen muss attraktiver, einfacher und effizienter gestaltet werden.

Abfallströme systematisch dem Recycling zuführen

Die Recyclingkette besteht aus mehreren Prozessstufen: Erfassen (Sammeln), Sortieren, Demontage, Aufbereitung⁸⁶ und metallurgisches Recyceln. Während auf der ersten Stufe die Verbraucher beteiligt sind,

die Altprodukte zum Wertstoffhof bringen oder in die entsprechenden Sammelbehälter werfen, gibt es am Ende der Kette europaweit nur einige wenige Metallhütten, die das gesamte Altmaterial metallurgisch verarbeiten. Die Abfallströme verdichten sich somit zum Ende der Recyclingkette.⁸⁷

Entlang dieser Kette gibt es heute zwar für fast alle Stoffe leistungsfähige Rückgewinnungsprozesse. Diese werden aber in vielen Fällen nicht ausreichend genutzt. Daher gehen nach wie vor auf allen Prozessstufen Stoffe verloren: von unzureichender oder fehlerhafter Sammlung der Abfälle⁸⁸ bis hin zu Verlusten in der mechanischen Aufbereitung oder in der nachfolgenden Metallurgie.⁸⁹ Es ist also entscheidend, die Abfallströme systematisch zu erfassen und dafür zu sorgen, dass sie bis zur metallurgischen Endverarbeitung in der Kette verbleiben. Dafür müssen allerdings auch die metallurgischen Verarbeitungskapazitäten in Deutschland und Europa vorhanden sein und genutzt werden. Es gilt der Grundsatz: weg vom „Abfall“-Management hin zum „Ressourcen“-Management.

Einen Hebel zu Verbesserung der Situation bietet die Abfallgesetzgebung.⁹⁰ Diese beinhaltet derzeit jedoch rein massen- beziehungsweise gewichtsbasierte Recyclingquoten für die stoffliche Verwertung, die sich zudem nicht auf die Ausbeute am Ende der Recyclingkette, sondern auf vorgelagerte Stufen (zum Beispiel Aufbereitung) beziehen. Dies führt zu einem Fokus vor allem auf die Rückgewinnung

⁸⁵ EC 2014-1.

⁸⁶ Die Aufbereitung bezeichnet Zerkleinerung (beispielsweise Schreddern) und Aufschluss gefolgt von mechanisch-physikalischen Trennverfahren (zum Beispiel Magnetscheidung, Dichtentrennung, optische Sortierung).

⁸⁷ Hagelüken 2015.

⁸⁸ Die Sammlung von Sekundärrohstoffen erfolgt zum Teil durch nicht registrierte Betriebe/Händler.

⁸⁹ Beispielsweise wenn Bauteile mit wertvollen Elementen nicht rechtzeitig ausgebaut werden: Kommt ein altes Auto in den Schredder, so können die Magnete mit Seltenen Erden im Nachgang nicht mehr herausgeholt werden.

⁹⁰ Zur Abfallgesetzgebung gehören unter anderem das Kreislaufwirtschaftsgesetz, das in erster Linie auf Verpackungsabfälle abzielt, das Elektro- und Elektronikgerätegesetz, die Altfahrzeug-Verordnung sowie das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren.

der Massenrohstoffe Stahl, Aluminium, Kunststoff und Glas. Die in viel kleineren Mengen vorkommenden Edel- und Sondermetalle bleiben nahezu irrelevant für die Erfüllung einer massenbasierten Quote. Das Ressourceneffizienz-Programm der Bundesregierung, *ProgRess I* (2012) und *ProgRess II* (2016), weist bereits auf die notwendige Verbesserung beim Recycling von Edel- und Sondermetallen hin.⁹¹ Als Lösungsansatz wird das Zugänglichmachen von Informationen über die Wertstoffinhalte für Produzenten und Entsorger sowie die Bündelung von Abfallströmen mit ähnlicher Metallzusammensetzung gesehen. Geeignete Erfassungssysteme müssten zunächst entwickelt werden.⁹²

Eine weitergehende Möglichkeit wäre, für bestimmte besonders ressourcenrelevante Produktgruppen beziehungsweise

Fraktionen daraus **technische Recyclingstandards**⁹³ europaweit verbindlich festzuschreiben. Diese sollten neben der Qualität der Recyclingprozesse auch die Kriterien der Wirtschaftlichkeit sowie der Umwelt- und sozialen Aspekte berücksichtigen. Die betroffenen edel- und sondermetallhaltigen Produkte/Fraktionen dürften dann entlang der Recyclingkette nur noch in nach diesen Standards auditierten und zertifizierten Anlagen verarbeitet werden. Ein möglichst effizientes Recycling nach dem besten Stand der Technik wäre so gewährleistet. Insbesondere für komplexe

⁹³ Ein entsprechender technischer Standard für die metallurgische Verarbeitung kupfer- und edelmetallhaltiger Elektronikfraktionen, der unter anderem Vorgaben von Mindest-Recycling-Quoten für einige Metalle enthält, wurde bereits durch führende Metallhütten gemeinsam mit Eurometaux und der European Electronics Recyclers Association erarbeitet. Derzeit wird dieser vom Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) in eine „Technical Guideline“ überführt. Für die Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten gibt es bereits einen CENELEC-Standard. Verbindlich vorgeschrieben sind diese Standards allerdings bisher nicht.

⁹¹ BMUB 2012, BMUB 2016.

⁹² BMUB 2016, Kap. 7.4.6.

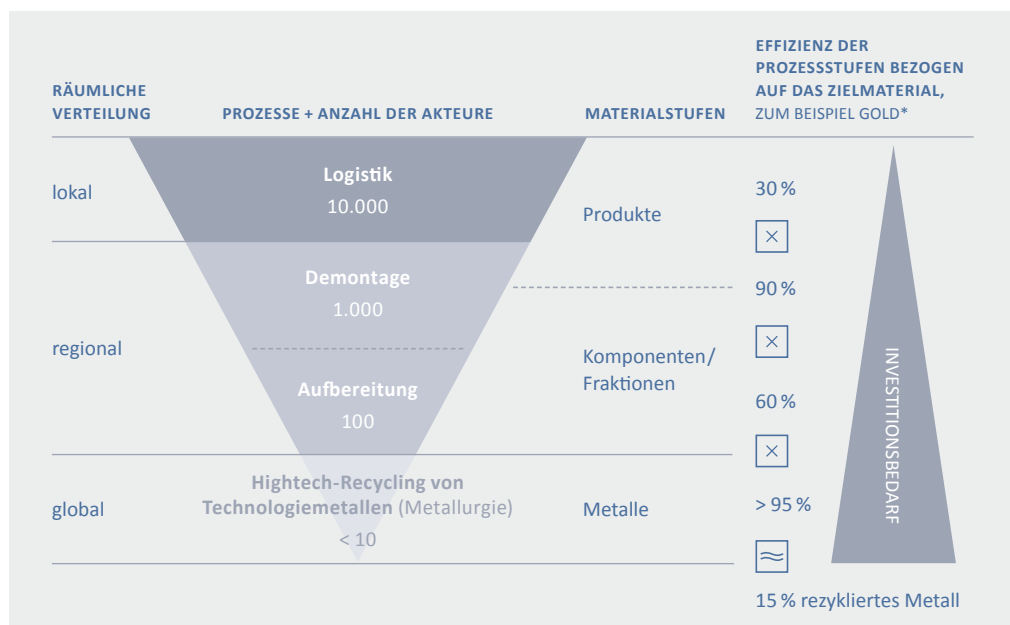


Abbildung 2: Recyclingprozesskette für Konsumgüter – Beispiel Recycling von Technologiemetallen aus Leiterplatten.⁹⁴ Der Überblick zeigt die Komplexität der Prozesskette und die damit verbundenen Herausforderungen.

* Die effektive Recyclingrate (Recyclingeffizienz) für ein Metall ergibt sich aus dem Produkt der Wirkungsgrade der einzelnen Stufen. Im Beispiel werden 30 Prozent der relevanten Altgeräte gesammelt (Sammelleffizienz), bei der Aufbereitung gehen 40 Prozent des Goldes in „falschen“ Fraktionen (Stahl, Kunststoff, Stäube etc.) verloren. Die Zahlen sind realistisch für die Gewinnung von Gold aus Consumer-Elektronik in Deutschland und Europa.

⁹⁴ Hagelüken 2014.

Produkte, die viele verschiedene wertvolle Metalle enthalten (zum Beispiel Leiterplatten, Lithium-Ionen-Batterien), wären solche technischen Standards gut geeignet. Wenn sich die Recycling-Technologien weiterentwickeln, können zudem technische Standards schnell angepasst werden.

Heute erfolgt auch in Europa die Vergabe von Recyclingaufträgen vor allem unter Kostengesichtspunkten, auf die tatsächliche Qualität der Recyclingprozesse wird hingegen noch zu wenig Wert gelegt. Vor allem bei komplexen Stoffgemischen aus Wertstoffen und Schadstoffen, wie das zum Beispiel bei Elektronikprodukten der Fall ist, ist aber ein hochwertiges Recycling teurer als ein „Rosinenpicken“ weniger Wertstoffe, das mit hohen Schadstoffemissionen einhergeht. Bei den derzeit niedrigen Rohstoffpreisen verschärft sich der Kostendruck noch weiter, sodass viele Recyclingmaterialien in ineffizienten Recyclinganlagen landen. Dieses Problem besteht sowohl bei der Aufbereitung als auch der metallurgischen Verarbeitung – auf beiden Prozessstufen könnte oft besser recycelt werden, wenn die dafür entstehenden Kosten auch weitergegeben werden könnten. Wäre das Recycling bestimmter komplexer Produktströme europaweit nur in zertifizierten Anlagen zulässig, so würde dies zu einem fairen, qualitätsbasierten Wettbewerb führen, der nicht zulasten von Umweltstandards und Rohstoffausbeuten ginge.

Während es auch für viele Sondermetalle bei einfachen Rückständen (zum Beispiel Produktionsausschuss) und bestimmten Materialkombinationen etablierte Recyclingverfahren gibt, liegt die Herausforderung in der Regel bei komplexen Produkten und Elementkombinationen. So sind weitere Fortschritte in der Aufbereitungstechnik erforderlich, mit denen einzelne Komponenten oder Materialien aus Produkten herausgelöst und den passenden metallurgischen Verfahren zugeführt werden können. Beispiele sind

schonende Aufschlussverfahren und Prä-Schreddertechnologien zur Abtrennung von Batterien, Leiterplatten und Magneten sowie Identifizierungs- und Sortierverfahren zur Trennung unterschiedlicher Aluminiumlegierungen. Bei der anschließenden metallurgischen Verarbeitung liegt die Herausforderung bei der Gewinnung von Seltenen Erden und den Hightech- und Sondermetallen wie Indium, Germanium, Gallium, Tellur, Kobalt oder Lithium aus komplexen „Multimetall“-Gemischen, wo teilweise noch keine etablierten Technologien existieren. Hier ist zunächst die **Entwicklung geeigneter metallurgischer Verfahren** und Prozesskombinationen erforderlich.

Um die Recyclingkette als Ganzes besser kontrollieren zu können, wäre denkbar, bei den zuständigen Behörden die Fachkompetenz für das Recycling aufzubauen, ähnlich wie diese bei den Bergbehörden für die Gewinnung der Primärrohstoffe vorliegt. Diese mit entsprechenden Fachleuten besetzten Behörden könnten die Reporting-Pflichten bei technischen Mindestanforderungen, Umwelt- und Sozialstandards überwachen. Das Aufgabenspektrum dieser Einrichtungen würde bei der Erfassung der Abfallströme beginnen und in der zertifizierten Recyclinganlage beziehungsweise bei der unterstützenden Hafenkontrolle im Falle der illegalen Ausfuhr von Elektronikschrott enden. Darüber hinaus könnten diese Einrichtungen in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt Produkte anhand ihrer Ressourceneffizienz zertifizieren, um die Verbraucher über die Recyclingfähigkeit zu informieren – ähnlich, wie der Verbraucher beispielsweise anhand des EU-Effizienzlabels über die Energieeffizienz von Haushaltsgeräten informiert wird. Zur Bewältigung dieser Aufgaben wäre eine Koordination zwischen Bund und Ländern erforderlich. Eine solche Maßnahme würde auch die gleichrangige Bedeutung von Primär- und Sekundärrohstoffen unterstreichen.

Sammelsysteme verbraucherfreundlicher gestalten

Nur wenn die Konsumenten motiviert sind, ihre Altprodukte tatsächlich abzugeben statt sie zu „horten“ oder über den Restmüll zu entsorgen, können genügend wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen werden. Obwohl es in Deutschland durchaus Möglichkeiten zur Rückgabe von Elektronik gibt (Wertstoffhöfe und Wertstofftonnen, Batterieboxen in Supermärkten etc.), werden sie teilweise von den Verbrauchern nicht umfassend genutzt, da sie als zu aufwendig empfunden werden (zum Beispiel lange Fahrt zum Wertstoffhof). Auch die Rücknahme von Altgeräten in den Geschäften großer Elektronikhändler⁹⁵ gestaltet sich noch zu wenig attraktiv für die Kunden.

Um dies zu ändern, bedarf es entweder konkreter finanzieller Anreize oder eines möglichst unkomplizierten Rückgabeprozesses, der dem Verbraucher wenig Aufwand verursacht.⁹⁶ **Pfandsysteme** für einige Elektronikprodukte oder **Leasingmodelle** könnten ebenfalls ein Ansatz sein.⁹⁷ Beim Leasing würden die Verbraucherinnen und Verbraucher nicht für den Besitz, sondern nur für die Nutzung des Gerätes zahlen. Bei Rückgabe würde das Pfand erstattet beziehungsweise die (monatliche) Leasinggebühr enden. Für die Einführung von Pfandsystemen bedürfte es allerdings entsprechender Regelungen. Leasingmodelle über die gesamte Lebensdauer des Produkts können langfristig für alle Beteiligten interessanter sein, da sich weitere Synergien ergeben

können.⁹⁸ Neben den Rückgabanreizen ist der entscheidende Vorteil von Pfand- oder Leasingssystemen, dass dadurch das Eigentum an den Altprodukten auf wenige professionelle Hersteller, Leasinggeber oder Flottenbetreiber beschränkt bliebe. Diese würden über eine kritische Masse an Altprodukten verfügen und könnten direkte Recycling-Verträge mit professionellen Recyclern abschließen, wodurch transparente Stoffströme und ein hochwertiges und kosteneffizientes Recycling unterstützt würden.

Illegale Elektroschrott-Exporte verhindern

Die Menge an Abfall von Elektro- und Elektronikgeräten⁹⁹ hat in den vergangenen Jahren dramatisch zugenommen. Schätzungen zufolge kommen allein im Jahr 2016 weltweit etwa 93,5 Millionen Tonnen im Wert von rund zwanzig Milliarden US-Dollar zusammen.¹⁰⁰ Schätzungsweise 25 bis dreißig Prozent des Elektro(nik)schrotts aus Europa wird illegal in Regionen ohne ausreichende Recyclinginfrastruktur exportiert und führt dort wegen seiner giftigen Bestandteile (zum Beispiel Quecksilber und Blei) und/oder gefährlicher Emissionen aus den primitiven Recyclingprozessen (Cyanide, Dioxine) teilweise zu erheblichen Umwelt- und

95 Mit der Neufassung des Elektro- und Elektronikgesetzes von Oktober 2015 sind Elektronikhändler mit einer Verkaufsfläche ab vierhundert Quadratmetern zur unentgeltlichen Rücknahme von Altgeräten verpflichtet.

96 Beispielsweise, in dem die Geräte in Geschäften abgegeben werden können, die der Verbraucher sowieso häufig aufsucht. So können in Frankreich alte Handys in Wäschereien abgegeben werden.

97 Hagelüken 2015.

98 Bei Consumer-Elektronik ließe sich für die Hersteller eine bessere Kundenbindung erreichen, Verbraucherinnen und Verbraucher könnten je nach Präferenz jeweils das aktuellste Modell nutzen oder auch zu günstigeren Gebühren dann in einer „Nutzerkaskade“ ein etwas älteres Modell. Hardware- und Software-Updates ließen sich zentral organisieren etc. Bei teuren Produkten, zum Beispiel Elektroautos, könnten im Fall intelligenter CarSharing-Modelle die Nutzungsgrade der Fahrzeuge erheblich erhöht und damit die Kosten gesenkt werden (Ellen McArthur Foundation/McKinsey 2015).

99 Bei den Mengenangaben ist zu berücksichtigen, dass die große Masse an Elektro- und Elektronikgeräten Weiße Waren (zum Beispiel Kühlschränke, Waschmaschinen), Haushaltsgeräte wie Kaffeemaschinen, Toaster, Werkzeuge, Spielzeug etc., sind. Diese beinhalten nur wenig Edel- und Sondermetalle. Reich an Edel- und Sondermetallen sind vor allem die Informations- und Kommunikationstechnik-Produkte (Handys, Computer) sowie Kameras, Audio, Video. Bei diesen Produkten nehmen die Stückzahlen zu, durch Miniaturisierung und abnehmende Edelmetallgehalte pro Gerät steigt die wiedergewinnbare Mengen an Edel- und Sondermetallen aber nicht unbedingt in gleichem Maße an.

100 Opalka 2014.

Gesundheitsschäden.¹⁰¹ Für Europa selbst stellen die illegalen Schrottexporte nicht nur einen volkswirtschaftlichen Verlust, sondern auch ein zunehmendes Sicherheitsproblem dar, da kriminelle Organisationen erheblich daran verdienen.¹⁰²

Da der Hauptumschlagsplatz für Transporte dieser Art die europäischen Häfen sind, könnte eine **Verstärkung der Hafenkontrollen** eine wirksame Gegenmaßnahme sein. Hätten die Hafenkontrollbehörden mehr Personal und mehr Container-Scanner zur Verfügung, könnten illegale Transporte leichter entdeckt werden. Würde die Verschiffung solcher Transporte auf bestimmte Häfen beschränkt, könnten die Transporteure auch nicht auf andere Häfen mit weniger Kontrollen ausweichen.

Das **System der Zolltarifnummern** könnte dahingehend geändert werden, dass bereits bei der Zollerklärung erkennbar ist, ob es sich um neue oder gebrauchte Güter handelt. Dies würde die Anschlusskontrollen erleichtern. Bisher wird lediglich nach Produktgruppen unterschieden.

Weiterhin könnte verlangt werden, dass Elektronikschrott künftig nur noch an zertifizierte Recyclinganlagen geliefert werden darf.¹⁰³ Eine merkliche Erhöhung der Strafen für die illegale Ausfuhr von Elektronikschrott könnte abschreckend wirken. Außerdem sollte darüber nachgedacht werden, welche zusätzlichen Maßnahmen in den Zielländern wirksam illegale Verwertungsstrukturen bekämpfen könnten. In diesem Bereich könnten etwa Polizei und Entwicklungszusammenarbeit kooperieren.

Insgesamt zeigt der illegale Elektroschrotthandel, dass es entlang der Rohstoffkette an Transparenz mangelt. Verbesserte Reporting-Pflichten und Kontrollmaßnahmen müssen daher auf den Weg gebracht werden, um wirksam gegen dieses Problem vorgehen zu können.

Anreize für ein recyclingfähigeres Produktdesign

Ressourceneffizienz wiederum beginnt bereits beim Produktdesign. Je mehr elektronische Komponenten mit Edel- und Sondermetallen verbaut werden, desto wichtiger ist es, dass diese am Ende ihrer Lebenszeit zurückgewonnen werden können. Wenn beispielsweise moderne Elektromotoren Magnete mit Seltenen Erden enthalten, sollten diese Elektromotoren zum Beispiel in einem Fahrzeug zugänglich sein, und die Magnete müssten sich aus den Motoren mit vertretbarem technischen Aufwand ausbauen lassen. Ähnliches gilt für Batterien und Akkus oder für Leiterplatten. Allerdings sind heute die Materialverbände der Elektronikprodukten oft so komplex, dass man nur schlecht an die relevanten Bauteile herankommt.

Eine Option, um dieses Problem grundsätzlich anzugehen, wären Regeln für ein recyclingfähigeres Produktdesign und/oder ein **Label zur Recyclingfähigkeit**, vergleichbar etwa dem Label zur Energieeffizienz bei Elektrogeräten.¹⁰⁴ Auch gilt es insgesamt, zur Erhöhung der Lebensdauer von Produkten beispielsweise durch Verschleißminimierung und bessere Reparaturfähigkeit beizutragen. Dazu bedarf es allerdings **verbindlicher einheitlicher europäischer Regeln und Produktstandards**. Diese müssten sich stets an der technischen Durchführbarkeit gegenwärtiger Recyclingverfahren orientieren. Bei entsprechender Umsetzung könnte ein recyclingoptimiertes Produktdesign ei-

¹⁰¹ UNEP 2015.

¹⁰² Laut der europäischen Polizeibehörde Europol besteht die Gefahr, dass Elektronikschrott zu einem kriminellen Handelsgut der Zukunft wird („Key Criminal Commodity of the Future“, EUROPOL 2015, S. 24).

¹⁰³ Eurometaux 2015, S. 10.

¹⁰⁴ Siehe auch Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, Handlungsoption 7.3.3: Ressourcenschonung in die Produktentwicklung einbeziehen, BMUB 2016, S. 55.

nen ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Beitrag zur Schaffung einer effizienten Kreislaufwirtschaft leisten.

3.2.2 Diversifizierte Bezugsquellen

Je mehr Rohstoffanbieter es gibt, desto besser können natürlich Ausfälle einzelner Anbieter kompensiert werden. Auf den Metallrohstoffmärkten gibt es allerdings seit mehreren Jahren eine zunehmende Konzentration hin zu wenigen Rohstoffunternehmen in immer weniger Ländern. Bei einigen Metallen existieren bereits Quasi-Monopole mit nur noch wenigen alternativen Anbietern.¹⁰⁵ Bei vielen wichtigen Rohstoffen für die Energiewende ist die Länderkonzentration wesentlich höher als beim Erdöl.¹⁰⁶ Im Hinblick sowohl auf ihre eigene Versorgungssicherheit als auch auf die Entwicklung der weltweiten Marktstrukturen wäre es sinnvoll, wenn die Importeure für Rohstoffe oder Zwischenprodukte ihre Bezugsquellen diversifizieren würden. In der Regel kaufen sie jedoch beim preisgünstigsten Anbieter, was bestehende Monopolsituationen – wie beispielsweise bei den Seltenen Erden aus China – weiter verschärft.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur wenige Metalle, in erster Linie Kupfer, Blei, Zink, Nickel, Aluminium und die Edelmetalle, an der Börse gehandelt werden. Bei vielen Metallen, die für die Energiewende wichtig sind, darunter Seltene Erden, die Platingruppenmetalle, Silizium, Lithium, Indium und Tantal, gibt es jedoch keinen derart einfachen Zugang. Rohstoffverbrauchende Unternehmen müssen sich zunächst Zugangswege für diese Rohstoff-

fe sichern. Eine Möglichkeit dazu ist, dass Unternehmen wie Technologiekonzerne, Hersteller von Windkraft- und Photovoltaikanlagen oder deren Zulieferer selbst Bergbau betreiben oder Beteiligungen an Rohstoffprojekten erwerben, mit denen langfristige Lieferverträge oder ein Vorkaufsrecht verbunden sind. Auf diese Weise können Unternehmen mehr Kontrolle über die ersten Stufen der Wertschöpfung gewinnen. Man bezeichnet dies als Rückwärtsintegration.

Die Bundesregierung unterstützt die deutsche Wirtschaft dabei bereits im Rahmen ihrer nationalen Rohstoffstrategie von 2010.¹⁰⁷ Dazu gehören verschiedene Finanzinstrumente zur **Absicherung von Rohstoffprojekten im Ausland gegen politische und wirtschaftliche Ausfallrisiken**, darunter:

- Investitions Garantien für Projekte in Schwellen- und Entwicklungsländern,
- Garantien für ungebundene Finanzkredite (UFK-Garantien)¹⁰⁸ zur finanziellen Absicherung von Rohstoffprojekten im Ausland gegen Kreditausfallrisiken,
- Exportgarantien (Hermes-Deckungen) zur Absicherung von Exportgeschäften gegen Zahlungsausfälle ausländischer Kunden.

Während einige dieser Maßnahmen, beispielsweise die UFK-Garantien, von der Industrie gut angenommen wurden,¹⁰⁹ wurde das 2013 neu aufgelegte **Explora-**

¹⁰⁵ Beispielsweise für monopolisierte Rohstoffmärkte sind die Märkte für Niob (neunzig Prozent der Weltproduktion in Brasilien), für Seltene Erden (86 Prozent der Weltproduktion in China) oder für Platin (68 Prozent der Weltproduktion in Südafrika).

¹⁰⁶ So liegt der Herfindahl-Hirschman-Index, der als Maß für die Länderkonzentration verwendet wird, bei Seltenen Erden bei über 7.000 sowie bei Vanadium und Lithium bei über 3.000, während er bei Erdöl, selbst wenn man die OPEC als ein Land betrachtet, lediglich 2.093 beträgt. Seltene Erden haben zusätzlich ein hohes Länderrisiko. Das heißt, die Lieferländer werden als unzuverlässig bewertet (DERA 2016).

¹⁰⁷ BMWi 2010.

¹⁰⁸ UFK-Garantien sind staatliche Garantien der Bundesrepublik Deutschland, mit denen Kreditgeber (Banken) von Rohstoffprojekten im Ausland gegen wirtschaftliche und politische Kreditausfallrisiken abgesichert werden. Eine Voraussetzung ist, dass aus dem finanzierten Vorhaben ein langfristiger Import eines als politisch förderungswürdig beurteilten Rohstoffs nach Deutschland erfolgt.

¹⁰⁹ So wurden im Jahr 2014 insgesamt 18 UFK-Anfragen gestellt, davon zehn für metallische Rohstoffe. Zum Jahresende wurden vier Garantien für Rohstoffprojekte vom Bund übernommen (Garantien für UFK 2014).

tionsförderprogramm¹¹⁰ des Bundes hingegen bereits am 31. März 2015 wegen mangelnder Nachfrage wieder eingestellt. Mit der Aufnahme einer Explorationsförderung in die Rohstoffstrategie der Bundesregierung wurde ausdrücklich die Erwartung verknüpft, dass seitens der Wirtschaft geeignete, rohstoffpolitisch förderwürdige, nachhaltige Explorationsprojekte identifiziert und zur staatlichen Förderung vorgeschlagen werden sollten. Die verzeichneten Antragseingänge haben diese Erwartungen nicht erfüllt.

Hier zeigte sich, dass die deutsche rohstoffverbrauchende Industrie trotz staatlicher Förderangebote zu einem Engagement in der Exploration und langfristigen Rohstoffsicherung nicht so einfach zu gewinnen ist. Auch die im Jahre 2012 auf Initiative des Bundesverbandes der Deutschen Industrie gegründete Allianz zur Rohstoffsicherung¹¹¹ wurde wegen mangelnder Nachfrage der Industrie bereits im Dezember 2015 wieder beendet. Ziel der Allianz war es, mit Beteiligung mehrerer deutscher Großunternehmen ein Rohstoffunternehmen zu gründen, welches Beteiligungen an Rohstoffprojekten, vornehmlich im Ausland, aufbaut.

Die Gründe dafür, dass die Industrie sich wenig für die Rohstoffsicherung engagiert, sind vielfältig. Zum einen suggerieren die niedrigen Rohstoffpreise derzeit, dass die Versorgungslage entspannt ist. Zum anderen ist Bergbau kapitalintensiv

und das Risiko ist höher als in der verarbeitenden Industrie.¹¹² Auch das fehlende Know-how im Metallbergbau, nachdem in den 1990er Jahren alle deutschen Metallgruben geschlossen und die ausländischen Beteiligungen verkauft wurden, stellt ein Hindernis dar.

Da die Rohstoffpreise in Zukunft voraussichtlich wieder steigen werden und Versorgungsengpässe möglich sind, kann es aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein, staatlich stärkere Vorsorge zu betreiben. Betrachtet man die Energiewende als Projekt von nationalem Interesse, so gilt dies in besonderer Weise für Rohstoffe, die für den Umbau des Energiesystems benötigt werden. Hierbei gilt es, eine angemessene Kombination aus Eigenverantwortung der Industrie und gesamtwirtschaftlichen rohstoffstrategischen Erwägungen zu finden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich langfristige Rohstoffsicherung (beispielsweise der Aufbau von Beteiligungen an Bergbauprojekten) am besten antizyklisch, also in Niedrigpreisphasen, bewerkstelligen lässt, damit die Kosten überschaubar bleiben.

Gründung eines international agierenden deutschen Rohstoffunternehmens

Bis Anfang der 1990er Jahre konnte die deutsche Industrie zum Beispiel Zink, Blei und Germanium zum Teil aus eigenen Quellen gewinnen. Unterstützt durch das erste staatliche Explorationsförderprogramm¹¹³ zwischen 1970 und 1990 war es zudem vor allem dem Bergbau- und Explorationsunternehmen Metallgesellschaft AG gelungen, einen umfangreichen ausländischen Grubenbesitz aufzubauen und ausländische Beteiligungen zu er-

¹¹⁰ Die Richtlinien über die Gewährung von bedingt rückzahlbaren Zuwendungen zur Verbesserung der Versorgung der Bundesrepublik Deutschland mit kritischen Rohstoffen (Explorationsförderrichtlinien) traten am 1. Januar 2013 in Kraft mit dem Ziel, deutsche Unternehmen bei der Aufsuchung potenziell kritischer nicht energetischer mineralischer Rohstoffe sowie bei der Akquise neuer Beteiligungen an Rohstoffprojekten zu unterstützen. Antragsberechtigt waren rechtlich selbstständige Unternehmen, die zur Durchführung des Vorhabens technisch und wirtschaftlich in der Lage waren, ihren Sitz und Geschäftsbetrieb in Deutschland hatten und hier die Voraussetzungen für eigene rohstoffwirtschaftliche Tätigkeiten boten.

¹¹¹ Aus der Allianz zur Rohstoffsicherung ging die Gesellschaft Rohstoffallianz GmbH hervor. Gründungsmitglieder und Gesellschafter der Rohstoffallianz waren unter anderem Aurubis, BASF, Bayer, BMW, Bosch und Volkswagen.

¹¹² Wellmer 1986.

¹¹³ Das Explorationsförderprogramm der Bundesregierung Maßnahmen zur Verbesserung und Versorgung der Bundesrepublik mit mineralischen Rohstoffen diente dazu, die Rohstoffversorgung der deutschen Industrie zu verbessern. Deutsche Firmen konnten mithilfe des Programms Beteiligungen an ausländischen Metallgruben aufbauen, was ihnen erlaubte, Rohstoffe teilweise selbst zu gewinnen und weiterzuverarbeiten (Rückwärtsintegration).

werben. Das jahrzehntelang aufgebaute Händlernetz garantierte maßgeblich den Erfolg des Unternehmens. Bedingt durch die finanzielle Schieflage der Gesellschaft 1993 wurden alle ausländischen Beteiligungen verkauft, das Know-how ging verloren. Die deutschen Metallerzgruben waren bereits 1992 aus Gründen der Wirtschaftlichkeit geschlossen worden, obwohl nur die wenigsten Buntmetallagerstätten in Deutschland völlig ausgeschöpft („ausgeerzt“) waren.¹¹⁴ Seitdem gibt es keinen größeren heimischen Grubenbesitz auf dem Metallerzsektor und kein größeres deutsches Rohstoffunternehmen mehr.

Da es ratsam ist, bei der Rohstoffversorgung für die Energiesysteme der Zukunft in längeren Zeiträumen zu denken, könnte es ein strategischer Vorteil für Deutschland sein, wenn es künftig wieder **ein international agierendes deutsches Rohstoffunternehmen** gäbe. Die Erfahrung der letzten Jahre (unter anderem mit der gescheiterten Rohstoffallianz) zeigt jedoch, dass die Gründung eines solchen Unternehmens durch rein privatwirtschaftliche Initiativen unwahrscheinlich ist. Stuft man die praktische Durchführung der Rohstoffsicherung als nationales Interesse ein, so könnte dies gegebenenfalls einen staatlichen Eingriff rechtfertigen.

Die Zurückhaltung der deutschen Industrie bei der Rohstoffgewinnung ist teilweise darin begründet, dass bei Investitionen im Rohstoffbereich aus betriebswirtschaftlicher Sicht eine Diskrepanz zwischen der Zyklizität am Rohstoffmarkt und der Investitionsrechnung besteht. Eine Lagerstätte in Produktion zu nehmen, dauert sieben bis zehn Jahre und ist mit einem sehr hohen Kapitalbedarf verbunden. Während dieser Zeit macht die Lagerstätte üblicherweise Verluste, die erst in der Produktionsphase durch Gewinne kompen-

siert werden können. Die Bewertung einer Investition wird betriebswirtschaftlich mit dem Kapitalwertverfahren durchgeführt, bei der die (Netto-)Zahlungsströme jeder Periode, zum Beispiel jedes Jahres, auf den Gegenwartswert diskontiert und aufsummiert werden. Bei einer Lagerstätteninvestition, vergleichbar mit Start-up-Unternehmen, sind die ersten Jahre negativ und die folgenden Jahre in Produktion hinsichtlich des erzielbaren Verkaufspreises unsicher. Nur wenn der erwartete zukünftige Verkaufspreis hinreichend hoch ist, hat die Investition einen positiven Kapitalwert und kann finanziert werden.

Die Prognose zukünftiger Preise ist mit einer großen Unsicherheit belegt, die an Rohstoffmärkten noch dadurch verstärkt wird, dass für die meisten Rohstoffe keine transparenten Preishistorien durch Börsen verfügbar sind.¹¹⁵ Nutzt man statistische Verfahren zur Fortschreibung der aktuellen Preise in die Zukunft, so erzielt man tendenziell dann höhere erwartete Preise, wenn man die Fortschreibung in einer Phase hoher Preise beginnt. Bei zyklischem Verhalten der Märkte folgen auf Hochpreisphasen aber auch niedrigere Preise. Diese Zyklen sind beispielsweise bei Agrarrohstoffen durch die Erntequalitäten, bei Industrierohstoffen durch die wirtschaftliche Lage und bei beiden ferner durch die Situation auf den Weltmärkten bedingt.

Während der Niedrigpreisphasen sind die Investitionsprojekte dann basierend auf der Preisfortschreibung nicht mehr profitabel und finden keine Finan-

¹¹⁴ Zum Beispiel der Rammelsberg bei Goslar, der 1988 geschlossen wurde.

¹¹⁵ Die sechs Nicht-Eisen-Metalle der London Metal Exchange sowie die Agrarrohstoffe der Chicagoer Börse sind hier eine Ausnahme, da diese weltweit als Referenzpreise akzeptiert werden. Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass auf diese Referenzpreise je nach Qualität des gehandelten Rohstoffs Auf- und Abschläge zu leisten sind, die wiederum intransparent sind und nicht systematisch erfasst werden. Beispielsweise wird Nickel in einer Qualitätsstufe an der LME gehandelt, die nur in sehr geringem Umfang in der Industrie zum Einsatz kommt. Das häufiger genutzte Ferro-Nickel (FeNi) notiert zu einem variablen Abschlag auf den LME-Nickel-Preis.

zierung oder werden abgebrochen. Durch mangelndes (erwartetes) Angebot der Rohstoffe steigt dann der Preis und der Zyklus beginnt erneut. Zum Beispiel stand der Nickelpreis Ende 2005 bei knapp 12.000 US-Dollar pro Tonne, stieg dann innerhalb von zweieinhalb Jahren auf 51.600 US-Dollar, um innerhalb von eineinhalb Jahren wieder auf das vorherige Niveau zurückzufallen. Derartige Preisveränderungen beeinflussen die Investitionstätigkeit in hohem Maße. Bei nicht börsengehandelten Rohstoffen, wie beispielsweise bei Seltenen-Erden-Elementen, fehlt zusätzlich die Transparenz über die Preisfindung, was die beschriebenen Effekte noch verstärkt.

Ein möglicher Ansatz, das beschriebene Zyklicitätsdilemma zu adressieren, wäre die Gründung einer staatlich geförderten Bergbau- oder Rohstofffirma. Im Folgenden werden zwei Ansätze für eine staatliche Beteiligung an einem solchen Unternehmen diskutiert.

Fall 1: In diesem Modell übernimmt die staatliche Firma als Bergbauunternehmen die Funktion eines Initiators

in der Primärgewinnung. Dies wäre einer Weiterentwicklung der Konzeption der Bundesregierung für marine Rohstoffe (siehe Kapitel 3.2.3). Hier sichert sich die Bundesregierung durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Konzessionen für einen möglichen späteren industriellen Abbau. Da die rohstoffverarbeitende Industrie im primären Rohstoffsektor (überwiegend Metalle) kaum eine ausreichende Langfristvorsorge für die benötigten Rohstoffe betreibt und da die finanziellen Anreize insbesondere in Zeiten niedriger Rohstoffpreise kurzfristig zu gering sind, ist zu überlegen, welche Rolle der Staat beim Aufbau eines nationalen Bergbauunternehmens auch für terrestrische Rohstoffe spielen könnte. Voraussetzung hierbei wäre, dass sich der Beginn des finanziellen Engagements auf Zeiten niedriger Rohstoffpreise begrenzt (Niedrigpreisphase in Rohstoffzyklen). Erfahrungsgemäß sind in den Niedrigpreiszeiten Preise für fortgeschrittene Projekte günstig, während in Hochpreiszeiten oft exorbitante Prämien gezahlt werden müssen (siehe Abbildung 3).

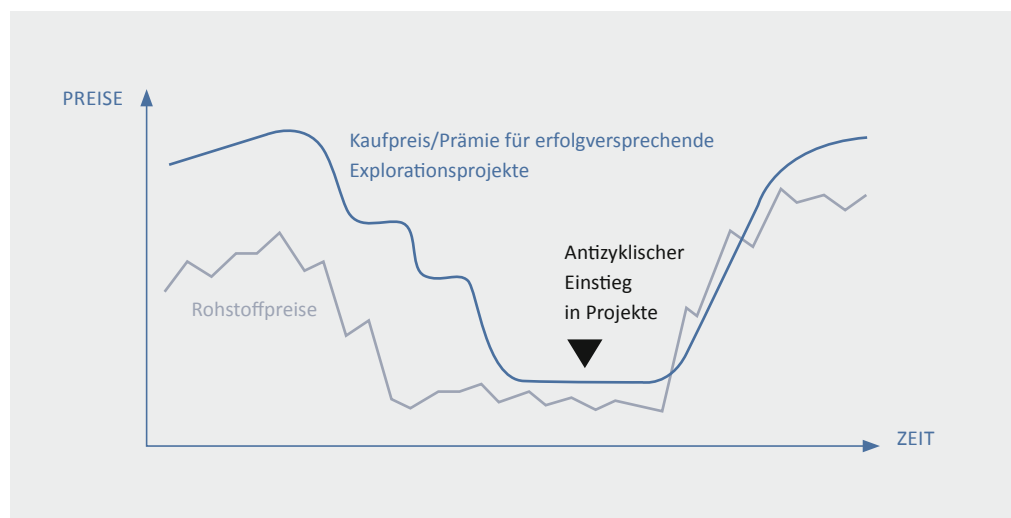


Abbildung 3: Modell für das antizyklische Investieren in Rohstoffprojekte: Prämien für erfolgversprechende Explorationsprojekte in Abhängigkeit von den Phasen des Rohstoffzyklus¹¹⁶

¹¹⁶ Die Einstiegsprämien in Lagerstätten sind nicht 1:1 von den Rohstoffpreisen abhängig. Sie sind auch beeinflusst von Stimmungen in der Rohstoffindustrie, zum Beispiel von Moden (welche Rohstoffe sind gerade „in“?) oder jüngsten Explorationserfolgen.

Hierbei könnte der Staat mit einer vergleichsweise geringen Initialfinanzierung von etwa 500 Millionen Euro über sieben bis zehn Jahre eine Bergbaugesellschaft fördern. Der diesem Modell zugrunde liegende Ansatz ist quasi eine „Vorratshaltung an Lagerstätten für Boom- und Krisenzeiten“. Da man Bergrechte und Anrechte an Vorkommen aber nicht erwerben und nur auf ihnen „sitzen“ kann, sondern immer eine Verpflichtung übernehmen muss, sie unter Umständen bis zum Feasibility-Status¹¹⁷ weiterzuentwickeln, ist ein derartiger Fonds nötig – auch um ein attraktiver Partner für Lagerstättenbesitzer kritischer Rohstoffe zu sein. Ziel sollte es also sein, einerseits Niedrigpreiszeiten für den Einstieg in attraktive Projekte zu nutzen, andererseits diese Niedrigpreiszeiten, in denen bei der deutschen Industrie kein Interesse an Rohstoffen besteht, da die Versorgungslage entspannt ist, zu überbrücken, bis das Interesse der Industrie in Knappheitszeiten wieder steigt.

In diesem Zeitraum könnten im internationalen Umfeld etwa fünf bis zehn bauwürdige Lagerstätten entwickelt werden. Hierbei sollte die staatliche Bergbaugesellschaft bestrebt sein, sich immer nur als „Anschubinitiator“ zu sehen und die Projekte möglichst schnell in privatwirtschaftliche Lösungen (wie Fremdfinanzierung, Hinzunahme von Partnern, Finanzierungsbeiträge von rohstoffverarbeitenden Unternehmen als Gegenleistung für langfristige Lieferzusagen etc.) zu überführen. Das staatliche Unternehmen könnte sich dann zurückziehen und die Lagerstätten könnten privatwirtschaftlich entwickelt und in Produktion gebracht werden. Die völlig eigenständige Entwicklung einer Lagerstätte bis hin zur Feasibility-Studie sollte daher nur eine Rückfallalternative sein, falls sich keine Partner finden lassen. Es könnten sogar auch ausländische Gesell-

schaften als private Partner in Erwägung gezogen werden, sofern sie Verpflichtungen für die Rohstoffversorgung der deutschen Industrie übernehmen.¹¹⁸

Durch dieses Modell könnten mehrere Rohstoffe abgedeckt werden, für die aktuell eine besonders hohe Marktkonzentration existiert und die für die Versorgung insbesondere der Energiesysteme der Zukunft und für neue Mobilitätskonzepte wichtig wären (zum Beispiel Seltene Erden, Lithium, Kobalt, Platingruppenmetalle, Kupfer etc.). Wenn der Staat zu Beginn des Projektes Unternehmenspartner für die Rohstoffabnahme beziehungsweise die Abnahme von hergestellten Zwischenprodukten dazugewinnt und mit der Zeit seine Beteiligungen an den Projekten wieder veräußert, wären die staatlichen Kosten und die staatlichen Beteiligungen vergleichsweise überschaubar. Die Gefahr wäre, dass sich bei einer zu geringen Investitionssumme keine Initialwirkung für ein längerfristiges privatwirtschaftliches Engagement einstellt und somit die Wirkung für die langfristige Rohstoffsicherung verpufft.

Fall 2: In diesem Modell geht die staatliche Bergbaugesellschaft Beteiligungen in Form von Aktienpaketen oder Direktinvestitionen bei bestehenden Produzenten von Rohstoffen und Zwischenprodukten ein und nutzt Investitionsgarantien und Garantien für ungebundene Finanzkredite des Bundes in diesem Bereich. Dieses Modell ist vergleichbar mit den Aktivitäten der Japan Oil, Gas and Metals National Corporation. Da die deutsche verarbeitende Industrie meist unmittelbar auf Produkte der höheren Wertschöpfungskette zurückgreift, könnten strategische Partnerschaften neben dem Bergbau (ab Feasibility-Status) mit Zulieferern vor allem der ersten Wert-

117 Der Feasibility-Status ist die Grundlage, um von Banken eine Finanzierungszusage für ein Projekt zu bekommen.

118 Vorbild wären die sogenannten Junior-Companies in Kanada oder Australien, die mit oft unkonventionellen Ideen nach einer Lagerstättenentdeckung die Entwicklung durch Hereinnahme von oft großen Firmen betreiben. Diese müssen je nach Projekterfolg stufenweise immer höhere Finanzbeiträge leisten, um Anteile zu erwerben.

schöpfungsstufen (Raffination, Herstellung von Legierungen, weitere frühe Verarbeitungsstufen) entwickelt werden, die sich bereits in Produktion befinden. Hierbei würde eine nationale Rohstoffgesellschaft über Direktinvestitionen und unter Zuhilfenahme bestehender Förderinstrumente des Bundes wie Investitions Garantien, Hermesdeckungen und Garantien für ungebundene Finanzkredite, strategische Beteiligungen bei Projekten im Bau oder bei bestehenden Produzenten eingehen.

An Großprojekten dieser Art sind üblicherweise weitere Partner beteiligt, welche das Investitionsrisiko auf mehrere Schultern verteilen: Banken, Beteiligungsgesellschaften, Unternehmen aus verwandten Branchen sowie die Abnehmer für die hergestellten Rohstoffe und Zwischenprodukte. Ein solches Instrument könnte von den bestehenden Förderinstrumenten des Bundes profitieren. So wurde beispielsweise über das UFK-Instrument im Jahr 2015 der Bau einer hochmodernen Schmelze zur Erzeugung von Siliziummetall auf Island flankiert, allerdings ohne Direktbeteiligung des Bundes.¹¹⁹

Ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Durchführung von staatlichen Direktbeteiligungen ist die JOGMEC. Sie sichert Rohstoffe für die japanische Wirtschaft in Kooperation mit ausländischen Partnern über eine Beteiligung, zum Beispiel für Niob als Stahlveredler mit dem bedeutendsten Niob-Produzenten der Welt in Brasilien, Cia. Brasileira de Metalurgia e Mineração. Mithilfe der JOGMEC sind japanische Großunternehmen in der Lage, sich Anteile an vielen der sehr guten neuen Lagerstätten zu sichern. Über Minderheitsbeteiligungen sichert man so den Fluss von Rohstoffen aus diesen Lagerstätten nach Japan langfristig ab.

In beiden beschriebenen Modellen ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für ein sol-

ches Rohstoffunternehmen, antizyklisch tätig zu sein, das heißt, in Niedrigpreisphasen Anrechte für später eintretende deutsche Firmen günstig einzukaufen. Werden, wie im Fall der gescheiterten Rohstoffallianz, solche Aktivitäten in Hochpreisphasen begonnen, kann der Zugang zu Rohstoffen nur mit der Zahlung hoher Prämien erkauf werden. Da sich auch Akteure, die bereits Oligopolstellungen innehaben, antizyklisch in Lagerstätten einkaufen,¹²⁰ könnte das antizyklische Engagement eines deutschen Rohstoffunternehmens auch der weiteren Anbieterkonzentration zum Beispiel bei den Seltenen Erden entgegenwirken.

Ein antizyklisch tätiges staatliches Bergbauunternehmen würde (im Fall 1) in Lagerstätten oder Explorationsvorhaben mit einem negativen (erwarteten) Kapitalwert investieren. Steigt während der Entwicklung der Lagerstätte nun der Marktpreis für die Produkte, so ändert sich der Kapitalwert und die Investition kann profitabel werden. Die Rohstoffwirtschaft ist jedoch risikoreich und der Erfolg eines Projektes von vielen unvorhersehbaren Faktoren abhängig. Der Staat geht daher mit einer solch hohen Beteiligung ein erhebliches wirtschaftliches Risiko ein. Bei einem Verkauf der Lagerstätte an die Privatwirtschaft müsste ein Preis erzielt werden, der das vergangene Risiko kompensiert. Da Hochpreisphasen im Rohstoffsektor mit einer expansiven Wirtschaftsleistung korrelieren und diese üblicherweise mit steigenden Realzinsen einhergeht, wird jedoch die Finanzierung der Übernahme der Lagerstätte für die Privatwirtschaft relativ teurer. Der Verkauf der Lagerstätte ist auch im Hochpreisszenario mit Unsicherheit zu bewerten. Im Falle von stagnierenden oder sinkenden Preisen, beispielsweise wenn aufgrund technischen Fortschritts Substitute für den Rohstoff ge-

119 Euler Hermes Aktiengesellschaft 2016.

120 So kaufen sich staatliche und halbstaatliche chinesische Unternehmen in Seltene-Erden-Lagerstätten, zum Beispiel Kvanefeld in Grönland und Catalão in Brasilien, ein (in Catalão wird Niob und Phosphor produziert, es ist aber ein großes Potenzial an Seltenen Erden vorhanden).

funden werden, geht die Investition nicht auf und das staatliche Bergbauunternehmen bleibt hinsichtlich dieses Rohstoffes defizitär.

Im Fall 2 gelten diese Überlegungen analog. Hier sind jedoch die absolute Höhe der Investition und die Dauer der Kapitalbindung und damit absehbar auch die Effektivität der Maßnahme geringer. Das Risiko ist dabei aber, relativ zum Fall der staatlichen Lagerstättenentwicklung, ebenfalls geringer.

In beiden Fällen ist überdies zu berücksichtigen, dass ex post zwar klar identifiziert werden kann, wann sich der Preis für einen Rohstoff in einer Hochpreisphase und wann in einer Niedrigpreisphase befindet, was in der jeweils aktuellen Situation – somit „in Echtzeit“ – immer unklar ist. Es ist stets unsicher, ob ein Preis noch weiter steigt, fällt oder ob eine Trendwende eintreten wird. Jede Berechnung, die darauf fußt, bei minimalen oder sehr geringen Rohstoffpreisen zu investieren und später den Rohstoff zu hohen Preisen zu verkaufen, ist daher zu optimistisch, da dies in der Praxis nahezu niemals mit hinreichender Sicherheit gelingen wird.

Zu bedenken ist zudem das nicht unerhebliche Risiko, dass öffentliche Unternehmen ineffizient arbeiten. Der Grund für die im Vergleich zu privaten Unternehmen oftmals Ineffizienz staatlicher Unternehmen liegt darin, dass private Unternehmen in der Regel nicht nur gewinnorientiert arbeiten (und daher auch Interesse an einer möglichst effizienten Leistungsproduktion haben), sondern zudem auch einer Kontrolle und Disziplinierung durch die Finanz- und Kapitalmärkte unterliegen. Dagegen verfolgen staatliche Unternehmen oft kein klares Gewinnziel, sondern mehrere, möglicherweise einander widersprechende Ziele, wie etwa eine günstige Versorgung der Nachfrager, Gewinnerzielung und politische Ziele. Dies ist problematisch, weil damit keine klare Erfolgsmessung möglich und letztlich

die Zielerreichung kaum überprüfbar ist. Zudem werden Leitungspositionen faktisch oftmals politisch besetzt und die Unternehmen unterliegen auch nicht so sehr dem Druck der Kapitalmärkte. Vielmehr operieren öffentliche Unternehmen mit weichen Budgetrestriktionen, die zu produktiver Ineffizienz, also ineffizientem Produktions- und Investitionsverhalten, „einladen“.

Während private Unternehmen oftmals durch Großaktionäre, Investmentfonds oder auch Familieneigentümer beaufsichtigt werden, die ein starkes Interesse an einer effizienten Unternehmensführung haben, werden staatliche Unternehmen durch (politische) Beamte, kommunale Würdenträger und andere Vertreter beaufsichtigt, welche die Interessen des Steuerzahlers (als Eigentümer) wahren sollen. Die staatlich besetzten Aufsichtsgremien wiederum werden mehr oder minder effizient durch die Parlamente (und Medien) kontrolliert, welche wiederum durch die Wähler kontrolliert werden.

Oft fehlt es den politisch besetzten Aufsichtsgremien an Kompetenz und Anreizen für eine effektive Kontrolle. Dies, ebenso wie das mehrstufige Kontrollkonzept¹²¹ führt dazu, dass das Management öffentlicher Unternehmen faktisch weniger effektiv beaufsichtigt wird als das Management von privaten Unternehmen. Die Aufsichtsprobleme lassen sich anhand zahlreicher öffentlicher Infrastrukturprojekte besonders deutlich illustrieren.¹²² Die Erfahrungen in verschiedenen Sektoren zeigen zudem, dass einmal gegründete staatliche Unternehmen aufgrund dieser Anreizstrukturen nur schwer wieder abzuschaffen oder in privatwirtschaftliche Strukturen zu überführen sind. Damit entstehen der Gesellschaft langfristige Kosten.

¹²¹ In der ökonomischen Fachsprache als vielstöckiges Prinzipal-Agenten-Problem bezeichnet.

¹²² Vgl. zum Beispiel Flyvbjerg 2005, Flyvbjerg/Sunstein 2015, Flyvbjerg 2014, Anzinger/Kostka 2015, Shapiro/Lorenz 2000.

Zwar gibt es durchaus auch Beispiele für staatliche Bergbaugesellschaften, die auch in einem privatwirtschaftlichen Umfeld erfolgreich agieren.¹²³ Das Risiko, dass die Gründung staatlicher Unternehmen zwar gut gemeint ist, letztlich aber doch die Aufsicht wenig effektiv ist und das Unternehmen ineffizient arbeitet, ist jedoch groß. Daher sollte sich, falls staatliche Beteiligung in Erwägung gezogen wird, der Staat im Wesentlichen als Bergbauinitiator verstehen und die Beteiligungen so schnell wie möglich in privatwirtschaftliche Lösungen überführen.

Grundsätzlich stellt sich jedoch die Frage, ob und warum Ausfallrisiken, die zumindest derzeit erfolgreich von Unternehmen getragen werden, überhaupt auf den Staat beziehungsweise die Gesellschaft übertragen werden sollen. Ein staatliches Bergbauunternehmen geht mit Verlustrisiken einher, die insbesondere aus der schwierigen Prognostizierbarkeit des zukünftigen Bedarfs herrühren. Falls für einen Rohstoff kein Marktversagen attestiert werden kann, ist ein staatlicher Eingriff daher schwierig zu rechtfertigen. Sobald ein Marktversagen allerdings manifest wird, ist ein solcher Eingriff verspätet. Es ist also eine strategische Entscheidung erforderlich, die die Verlustrisiken eines staatlichen Bergbauunternehmens gegen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Marktversagens im Sinne einer Versorgungskrise und gegen die möglichen Folgen eines Versorgungsausfalls (unter anderem für den Umbau des Energiesystems) abwägt.

Ist nun also die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Marktversagens hinreichend hoch, um einen umfassenden staatlichen Eingriff zu rechtfertigen? Bisher

scheint der Sektor aus volkswirtschaftlicher Sicht mit den hier genannten Risiken umgehen zu können. Ähnlich wie andere Märkte, die von Preiszyklen und langen Investitionshorizonten geprägt sind, verfügt der Rohstoffsektor grundsätzlich über gut funktionierende, wenngleich zum Teil riskante Geschäftsmodelle. Unternehmen können zudem verschiedene Finanzinstrumente nutzen, um sich gegen Ausfallrisiken abzusichern. Allerdings wäre es mit Blick auf nicht börsengehandelte Rohstoffen sinnvoll, Mechanismen zu finden, welche die Preisfindung transparenter gestalten.¹²⁴

Entscheidend ist aber nicht nur, ob die Märkte derzeit gut mit den Risiken umgehen können, sondern auch, ob das mit hinreichender Sicherheit in Zukunft so bleiben wird. Indizes, mit deren Hilfe sich die Kritikalität von Rohstoffen quantifizieren lässt, zeigen, dass sich die Versorgungslage beispielsweise bei Seltenen Erden zunehmend verschärft.¹²⁵ Auch die zunehmenden Oligopolstellungen Chinas durch Lagerstättenkäufe insbesondere in Afrika sowie die jüngst verhängten Exportverbote von Nickelerz aus Indonesien und den Philippinen deuten darauf hin, dass der Zugang zu Rohstoffen durch die Rohstoffpolitik der Lieferländer zukünftig erschwert werden könnte. Die Bemühungen marktbasierter westlicher Volkswirtschaften, durch verstärkte Forschungsanstrengungen, Diplomatie und eine Beschwerde gegen China bei der Welthandelsorganisation die Dominanz Chinas im Seltene-Erden-Markt zu durchbrechen, konnten die Marktstrukturen bisher nicht wesentlich verbessern.¹²⁶

¹²³ Beispiele sind CODELCO in Chile, die größte Kupferbergbaugesellschaft der Welt, oder LKAB, die staatliche schwedische Eisenerzgesellschaft, die die Lagerstätten im hohen Norden Schwedens unter schwierigen Bedingungen erfolgreich abbaut (World Bank 2011).

¹²⁴ Ein Ansatz dafür könnte die in Abschnitt Internationale Vernetzung beschriebene Study Group für Seltene Erden sein.

¹²⁵ Indizes für die Kritikalität von Rohstoffen, unter anderem der Herfindahl-Hirschman-Index und das gewichtete Länderrisiko, werden in Angerer et al. 2016 ausführlich diskutiert.

¹²⁶ Klossek et al. 2016.

Um die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Marktversagens sowie den zu erwartenden Schaden für die deutsche Volkswirtschaft durch eine Versorgungskrise einzuschätzen, wäre der Ausbau des bestehenden Frühwarnsystems bei der DERA im Rahmen des DERA-Rohstoffmonitorings möglich. Dieses sollte neben den Faktoren Preisentwicklung, Preisschwankung (Volatilität), Marktvolumen (gehandelte Ware), Marktkonzentration, physische Verfügbarkeit (Exploration, Produktion, Lager) sowie einer Bewertung der politischen Risiken der Primärproduktion weitere Aspekte wie die zeitlichen Veränderungen des internationalen Rohstoffhandels oder eine engmaschigere Analyse der Entwicklung von Nachfrage-trends berücksichtigen. Entscheidend ist, dass das Frühwarnsystem nicht dazu dient, kurzfristige Marktsignale¹²⁷ zu bewerten, sondern anhand des langfristigen Risikos die strategische Entscheidung unterstützen soll, ob staatliche Maßnahmen angebracht sind. Bei seiner Entwicklung sollten Rohstofffachleute sowie Politikwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler ebenso beteiligt sein wie Volkswirtinnen und -wirte. Bei der Entscheidung für oder gegen die Einrichtung eines staatlichen Bergbauunternehmens oder ähnlicher Maßnahmen, die aus Steuergeldern finanziert werden, würde ein solches Frühwarnsystem eine wissenschaftliche Basis bieten.

Der Nutzen der Prävention ist dabei allerdings voraussichtlich schwer messbar und nicht unmittelbar zu quantifizieren. Um einen nennenswerten Einfluss auf Angebotsmengen und Preise zu haben, müsste ein solches staatlich unterstütztes Rohstoffunternehmen substantielle Marktanteile erzielen. Selbst wenn dies gelänge, dürfte angesichts der starken Marktkonzentration in vielen Rohstoffmärkten das Unternehmen selbst zu einem Oligopolisten aufsteigen. Erfahrungen aus

verschiedenen Wirtschaftssektoren zeigen allerdings, dass staatliche Oligopolisten oder Monopolisten trotz einer staatlichen Kontrolle starke Anreize haben, Angebotsmengen bewusst knapp zu halten, um hohe Oligopolpreise zu verlangen. Dies könnte Verbesserungen bei der Versorgungssicherheit in der kurzen Frist mittelfristig wieder (über-)kompensieren. Gleichzeitig können die Kosten für die Gesellschaft dadurch vergleichsweise hoch ausfallen. Dies ist insbesondere auf die oben beschriebenen Anreizprobleme und den Umstand zurückzuführen, dass der Staat eine mittelfristig wohl unwirtschaftliche Aufgabe übernehmen würde.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aus rohstoffstrategischer Sicht zwar Handlungsbedarf bestehen mag, es aus ökonomischer Sicht aber fraglich ist, ob und unter welchen Umständen die staatliche Beteiligung an einem Bergbauunternehmen als präventive Maßnahme gegen mögliche zukünftige Versorgungsengpässe gerechtfertigt und erfolgsversprechend sein kann. Eine umfassende Prüfung der Vor- und Nachteile, Chancen und Risiken in Abhängigkeit von den betrachteten Rohstoffen und Modellen der staatlichen Beteiligung ist daher unbedingt erforderlich.

Entscheidet man sich für eine staatliche Förderung, so könnte diese an die Einhaltung hoher Umwelt- und Sozialstandards unter Verwendung der besten verfügbaren Technologie geknüpft werden. Auf diese Weise könnte ein deutsches Rohstoffunternehmen auch zur Verbreitung umwelt- und sozialverträglicher Bergbaupraktiken beitragen.

Niedrigpreisphasen durch Care and Maintenance überbrücken

Eine Maßnahme, die bisher nicht in der Rohstoffstrategie des Bundes enthalten ist, würde bei ungewöhnlich niedrigen Weltmarktpreisen für Rohstoffe oder Dumpingpreisen einzelner Anbieter greifen: Berg-

¹²⁷ Zur Unterscheidung langfristiger und kurzfristiger Trends siehe S. 20 (Box).

werke, die sonst wirtschaftlich arbeiten, aber durch Niedrigstpreise in Bedrängnis geraten sind, könnten staatlich gestützt werden. Je nach betriebswirtschaftlicher Notwendigkeit würde der Betreiber die Aktivitäten bis auf die Instandhaltungsarbeiten herunterfahren (**Care and Maintenance**).¹²⁸ Das Bergwerk befände sich quasi in „Stand-By“-Modus. Der Staat könnte die Explorationsarbeiten finanziell unterstützen. Mit diesem Modell ließe sich ein Bergwerk am Leben erhalten, sodass in Zeiten steigender Rohstoffpreise schneller wieder auf die Lagerstätte zugegriffen werden kann. Die Wiedereröffnung eines komplett geschlossenen Bergwerks würde in jedem Fall mehr kosten als die temporäre Unterstützung auf Basis von Care and Maintenance. Auf diese Weise könnte der Monopolbildung entgegengewirkt werden.

Das Beispiel der Wolframgrube Mittersill in Österreich zeigt, dass ein solches Vorgehen aus rohstoffstrategischer Sicht sinnvoll sein kann: Die Grube konnte trotz einbrechender Wolframpreise auf Care-and-Maintenance-Basis mit staatlicher Unterstützung 1992/93 offengehalten werden. Die Unterstützung der österreichischen Regierung beschränkte sich dabei auf die Explorationsarbeiten. Alle anderen Betriebs- und Personalkosten wurden weiterhin vom Grubenbetreiber getragen. Heute ist die Grube Mittersill wieder ein bedeutender Wolframproduzent in der EU. Da Wolfram gemäß EU-Kommission ein kritischer Rohstoff ist, kann diese Maßnahme als Beitrag zur europäischen Versorgungssicherheit gewertet werden.

Auch international wäre es denkbar, dass die EU bestimmte Bergwerke außerhalb Europas auf Care-and-Maintenance-Basis finanziell aufrechterhält und dafür im Gegenzug vergünstigte langfristige Lieferungen erhält. Die Kehrseite solcher

staatlichen Eingriffe in den Markt können natürlich Wettbewerbsverzerrungen sein. Zudem geht der Staat, ähnlich wie für das staatliche Bergbauunternehmen beschrieben, ein erhebliches ökonomisches Risiko ein. Denn wann und in welchem Maße die Rohstoffpreise wieder steigen, ist nicht vorhersehbar. Damit einher geht die Frage nach der Abwägung, welche Bergwerke wie lange von staatlichen Unterstützungen profitieren können. Am Ende ist dies eine politische Entscheidung, die gleichermaßen betriebswirtschaftliche, wirtschaftspolitische und strategische Aspekte berücksichtigen muss.

Bergbau in Deutschland und Europa

Für Indium, Germanium, Wolfram, Lithium oder Nickel gibt es in Deutschland Potenziale, die zur Neuentdeckung von Primärlagerstätten führen können. Neben dem Recycling könnten diese zu einer stärkeren Versorgung aus inländischen Rohstoffquellen beitragen. Die folgenden Maßnahmen könnten dazu beitragen, diese Vorkommen kommerziell zu nutzen:

- Forschung als Vorarbeit für die kommerzielle Exploration.¹²⁹ Dass auch in einem Land mit einer langen Bergbautradition durch neue Explorationsmethoden bisher unbekannte bauwürdige Lagerstätten zu finden sind, zeigt beispielsweise die Entdeckung der bedeutenden Wolframlagerstätte Mittersill in Österreich im Jahre 1967, die auf der Basis eines wissenschaftlichen Konzeptes gefunden wurde.
- Es gibt in Deutschland – im Wesentlichen in Sachsen – bekannte Metallvorkommen, die potenziell wirtschaftlich wären, wenn es gelänge, die technischen Probleme der Aufbereitung zu lösen. Das beste Beispiel ist die Zinn-Wolfram-Fluorit-Lagerstätte Pöhla in

¹²⁸ Care and Maintenance umfasst die Instandhaltung der Infrastruktur eines Bergwerks, wie zum Beispiel Pumpen, Wasserhaltung, Sicherungsarbeiten, aber auch Explorationsarbeiten.

¹²⁹ Das *r⁴*-Programm des BMBF fördert erstmalig seit den 1980er Jahren wieder Forschungsarbeiten zur Erkundung von Primärrohstoffen.

Sachsen.¹³⁰ Hier sind verstärkte Forschungsanstrengungen notwendig, um die bestehenden Probleme der mechanischen Aufbereitung und metallurgischen Verarbeitung zu lösen.

- Steuerliche Förderung als Unterstützung für eine Grubeninvestition

Im europäischen Kontext wäre auch vorstellbar, einen auf freiwilliger Basis organisierten „**Europäischen Fonds für kritische Rohstoffe**“¹³¹ zu gründen. Er könnte die Nutzung vielversprechender europäischer Lagerstätten¹³² finanzieren, um die Versorgungsketten beispielsweise bei Seltenen Erden und anderen potenziell kritischen Rohstoffen zu diversifizieren. Vorstellbar wäre auch hier eine Gemeinschaftsfinanzierung durch private und öffentliche Geldgeber, um solche Projekte längerfristig betreiben zu können.

Eine wichtige Frage ist, inwieweit Bergbauprojekte in Deutschland und Europa von der Bevölkerung befürwortet oder zumindest geduldet werden.¹³³ Untersuchungen für Energieprojekte zeigen, dass die Art und Weise, wie Projekte kommuniziert und geplant werden, von großer Bedeutung für die Akzeptanz sind. Je mehr und je früher Kommunikations- und Beteiligungsmöglichkeiten an den Planungs- und Entscheidungsprozessen gewährleistet sind, desto größer sind die Chancen, eine Lösung zu finden, die von allen akzeptiert

wird.¹³⁴ In diesem Zusammenhang ist auch die rechtliche Ausgestaltung von Genehmigungsverfahren im Hinblick auf Transparenz und Beteiligungsprozesse von großer Bedeutung.¹³⁵

3.2.3 Marine Rohstoffe

Sollte der weltweite Bedarf an metallischen Rohstoffen künftig weiter steigen, könnten die marinen Rohstoffe als zusätzliche Versorgungsquelle in Betracht kommen. In der Tiefsee werden reichhaltige Vorkommen vermutet, die noch unerschlossen sind. Dabei handelt es sich unter anderem um polymetallische Knollen („Manganknollen“¹³⁶), kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten¹³⁷ und hydrothermale Sulfiderze¹³⁸. Viele darin vorkommende Metalle sind wichtige Elemente für die Energiesysteme der Zukunft.

Es ist allerdings noch nicht absehbar, welche Rolle marine Rohstoffe spielen können. Derzeit arbeiten einige Unternehmen daran, die Abbautechnologien zu verbessern und zu automatisieren. Entsprechende Geräte werden bereits in großen Wassertiefen getestet.¹³⁹ Doch die Kosten für Exploration und Abbau von Rohstoffen aus der Tiefsee könnten um ein Vielfaches

¹³⁰ Mit Wolfram und Fluorit sind damit zwei von der EU als kritisch angesehene Rohstoffe darin enthalten.

¹³¹ ERECON 2015, S. 84.

¹³² Beispielsweise die Seltenen-Erden-Lagerstätten Norra Kärr in Schweden und Kvanefield im südlichen Grönland.

¹³³ Im Rahmen der Fördermaßnahme *rd – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe* des BMBF wurde im Jahr 2015 das Projekt *GORmin – Governanceoptionen für die akzeptable Gewinnung wirtschaftsstrategischer Ressourcen aus primären und sekundären Lagerstätten in Deutschland* aufgelegt. Ziel des Projektes ist es, gesellschaftliche Konfliktlinien bei Bergbauprojekten in Deutschland zu analysieren und Lösungsansätze für Gestaltungsoptionen zu erarbeiten. Die Ergebnisse des von 2015 bis 2018 laufenden Projektes stehen noch aus.

¹³⁴ Renn 2015, S. 59.

¹³⁵ Strategieempfehlungen an Politik und Wirtschaft aus juristischer Sicht für den Rohstoffabbau in Deutschland werden beispielsweise durch den Arbeitskreis *Akzeptanz und Effizienz in der Vorhabenplanung* der Regierungskommission des Landes Niedersachsen *Europäische Umweltpolitik und Vorhabenplanung* erarbeitet. Die Ergebnisse wurden Ende 2016 veröffentlicht.

¹³⁶ Polymetallische Knollen (Manganknollen) sind kleine schwarzbraune Knollen von etwa ein bis zehn Zentimeter Durchmesser. Sie wachsen sehr langsam in sedimentbedeckten Tiefseegebieten in einer Wassertiefe von 4.000 bis 5.000 Metern. Die größten Vorkommen befinden sich im sogenannten Manganknollengürtel in der Clarion-Clipperton-Zone im Zentralpazifik. Sie enthalten die Wertmetalle Kupfer, Nickel und Kobalt.

¹³⁷ Kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten sind wenige Zentimeter dicke Überzüge beziehungsweise Krusten aus Mangan-Eisen-Oxid, die an Oberflächen aus harten Gesteinsformationen der Tiefsee angelagert sind. Zusätzlich zu erhöhten Gehalten an Kobalt können sie wertvolle Spurenmetalle wie Platin, Tellur und Wolfram enthalten.

¹³⁸ Hydrothermale Sulfiderze kommen entlang vulkanischer Strukturen (ozeanischer Bergrücken, Inselbögen) in verschiedenen Meerestiefen vor. Sie können erhöhte Konzentrationen an Kupfer, Zink, Gold, Silber, Indium und Germanium enthalten.

¹³⁹ Wiedicke et al. 2012; OECD 2016.

höher sein als bei Lagerstätten an Land. Ob es sich für Unternehmen eines Tages wirtschaftlich lohnt, Metalle aus dem Meer zu gewinnen, hängt somit vor allem vom konventionellen Rohstoffangebot und der Preisentwicklung ab: Wenn genügend Metalle zu günstigen Preisen auf dem Weltmarkt verfügbar sind, ist es wenig attraktiv, marine Rohstoffe aufwendig zu erschließen. Dennoch bezeichnet der *Nationale Masterplan Maritime Technologien* des Bundeswirtschaftsministeriums von 2011 den Meeresbergbau als Option zur Sicherung des deutschen Rohstoffbedarfs.¹⁴⁰ Wenn er eine tragende Säule der Rohstoffstrategie werden soll, ist zu überlegen, wie die Forschung in den Bereichen Abbau, Verarbeitung und Umweltverträglichkeit intensiviert werden kann. Benötigt werden vor allem mehr Informationen darüber, wie sich die Abbaumethoden auf die sensiblen Ökosysteme der Tiefsee, aber auch auf die Fischerei und den Menschen auswirken. Deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen könnten zudem einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung umweltverträglicher Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Verhüttungstechnologien von metallischen Rohstoffen aus der Tiefsee leisten. Gleichzeitig gilt: Je eher belastbare Informationen zur Verfügung stehen, desto eher können die künftigen Kosten abgeschätzt und neue Rohstofflagerstätten erkundet werden.

Den Anfang hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe gemacht, indem sie bereits seit 2006 von der Internationalen Meeresbodenbehörde ein etwa 80.000 Quadratkilometer großes Lizenzgebiet im Zentralpazifik zur Erforschung von polymetallische Knollen erworben hat. Das auf 15 Jahre angelegte Forschungsprojekt soll unter anderem Umweltreferenzdaten sammeln, um die Auswirkungen eines späteren industriellen Abbaus der Knollen zu bewerten.¹⁴¹ Einen

weiteren Lizenzvertrag zur Erkundung von Sulfid-Lagerstätten im Indischen Ozean hat Deutschland 2015 unterzeichnet. Auf einem circa 10.000 Quadratkilometer großen Gebiet südöstlich von Madagaskar können fortan Sulfidlagerstätten erkundet werden. Beide Erkundungslizenzen können nach dem Ende der Laufzeiten zu Abbaulizenzen werden.¹⁴²

Mit dem Erwerb der Erkundungslizenzen, den genannten Forschungsaktivitäten sowie dem Beitrag zur Erarbeitung einer Meeresbergbaukonvention¹⁴³ im Rahmen des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen hat Deutschland als Staat bereits erheblich in die Entwicklung des Meeresbergbaus investiert. Nun stellt sich die Frage, ob und wie der Übergang zu einer kommerziellen Nutzung der Lagerstätten in der Tiefsee gestaltet werden sollte. Ein wichtiger Baustein hierfür wäre ein sogenannter „Pilot-Mining-Test“ (Versuchsbergbau), um den Abbau zu erproben und die damit in Zusammenhang stehenden Umweltauswirkungen zu erfassen. Wie die Beispiele des Explorationsförderprogramms und der beendeten Rohstoffallianz zeigen, ist die deutsche Industrie für ein Engagement selbst bei konventionellen terrestrischen Lagerstätten schwer zu gewinnen.¹⁴⁴ Bei den nichtkonventionellen Rohstoffen aus dem Meer ist ohne weitere staatliche Starthilfen daher vermutlich kein Engagement der Industrie zu erwarten.

Diese Situation könnte in Zukunft zu einem Wettbewerbsnachteil gegenüber jenen Ländern führen, die derzeit ebenfalls aktiv die Rohstoffpotenziale der Meere erkunden, um sie später abbauen zu können:¹⁴⁵ China, Japan, Indien, Südkorea und Russland, die sich ebenfalls Konzessionen gesichert haben, betreiben auch be-

140 BMWi 2011.

141 BGR 2014.

142 BMWi/BGR 2015.

143 In der Meeresbergbaukonvention sind Regeln definiert, nach denen der zukünftige Meeresbergbau durchgeführt werden sollte.

144 Vgl. Abschnitt Diversifizierte Bezugsquellen.

145 International Seabed Authority 2015.

reits staatlich finanzierte Exploration¹⁴⁶, um sich eine gute Ausgangsposition für einen späteren kommerziellen Abbau zu sichern. Unter der Jurisdiktion der Internationalen Meeresbodenbehörde werden vermutlich staatliche oder semistaatliche Firmen aus China, Indien oder Japan die ersten sein, die Meeresrohstoffe außerhalb ihrer jeweiligen ausschließlichen Wirtschaftszone¹⁴⁷ abbauen werden. Aus deutscher Sicht wäre eine Fortführung und Ausweitung des Engagements, unter anderem die Entwicklung innovativer Technologien, somit aus rohstoffstrategischen Gründen in jedem Fall überlegenswert. Darüber hinaus könnte Deutschland von Anfang an darauf hinwirken, dass weltweit hohe Umwelt- und Sicherheitsstandards für den Meeresbergbau eingeführt werden, um die Ökosysteme der Meere zu schützen.

Das Modell der staatlichen Förderung entspräche weitgehend dem in Abschnitt Diversifizierte Bezugsquellen beschriebenen Fall 1 für ein deutsches Bergbauunternehmen. Die dort dargestellten Argumente, die aus wettbewerbsökonomischer Sicht gegen eine solche staatliche Förderung sprechen, sind auch bei den marinen Rohstoffen gegen die rohstoffstrategischen Gründe abzuwägen.

3.2.4 Lagerhaltung

Einen weiteren Hebel zur Reduktion von Versorgungsrisiken bietet die Lagerhaltung. Üblicherweise sind die Unternehmen selbst dafür verantwortlich, welche Rohstoffe sie – in Abhängigkeit von den aktuellen beziehungsweise erwarteten Weltmarktpreisen – in welchen Mengen und über welchen Zeitraum einlagern. Bei kritischen Rohstoffen kann jedoch auch der Staat ein Interesse daran haben, dass

ausreichend Reserven im Inland zur Verfügung stehen. Für eine staatlich-strategische Vorratshaltung gibt es zwei denkbare Alternativen: Entweder die Industrie wird mithilfe von Zuschüssen oder Steueranreizen bewogen, mehr Rohstoffe einzulagern, oder der Staat übernimmt selbst die zentrale Lagerhaltung.

Programme für eine von Staat und Wirtschaft gemeinsam verantwortete Vorratshaltung strategischer Metalle gibt es etwa in Japan¹⁴⁸ und Südkorea¹⁴⁹. Allerdings könnte diese Art des Eingriffs als Subvention interpretiert werden, die bestimmten Unternehmen einen Vorteil verschafft. Nach dem Auslaufen der staatlichen Unterstützung zur Bevorratung könnten die Rohstoffe zudem sofort wieder weiterverkauft werden. Die gewünschte Wirkung, nämlich dass die Industrie über einen längeren Zeitraum Reserven bildet, um in Hochpreisphasen genügend Rohstoffe vorrätig zu haben, würde verpuffen.

Alternativ könnte der Staat selbst die zentrale Lagerhaltung übernehmen.¹⁵⁰ Analog zu den strategischen Erdölreserven des Bundes könnten auch kritische Metallrohstoffe über einen längeren Zeitraum unter staatlicher oder teilstaatlicher Ver-

146 International Seabed Authority 2014.

147 Die ausschließliche Wirtschaftszone ist laut Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen eine zweihundert Seemeilen breite Zone entlang der Basislinie der Küste, in der der Küstenstaat souveräne Rechte zur Erforschung, Ausbeutung und Nutzung der lebenden und nichtlebenden Ressourcen des Meeres, des Meeresbodens und des Untergrundes besitzt (vgl. UNCLOS 1982, Art. 55-57).

148 In Japan gibt es das Programm Rare Metals Stockpiling. Es legt nationale Reserveziele fest, wonach der Staat Rohstoffe für 42 Tage und die Privatwirtschaft für 18 Tagen lagern sollen. Betroffen sind die Metalle Chrom, Kobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Vanadium und Wolfram. Die genauen Bestandshöhen der strategischen Reserven sind aufgrund von Spekulationsgefahr nicht öffentlich bekannt (JOGMEC 2014). Zudem wird bei Gallium, Indium, Niob, Platin, Seltene Erden, Strontium und Tantal die Lage an den Rohstoffmärkten beobachtet (TU Clausthal/BGR 2013, S. 75).

149 Korean Resources Corporation (KORES) ist ein staatliches Energie- und Rohstoffunternehmen der koreanischen Regierung, das weltweit Rohstoffe für die koreanische Wirtschaft sichert. KORES ist verantwortlich für den Einkauf von insgesamt acht strategischen Rohstoffen: Eisenerz, Zink, Bitumen, Kohle, Uran, Kupfer, Nickel, Seltene Erden und andere seltene Metalle. Die Organisation betreibt zudem Vorratslagerhaltung für seltene Metalle (KORES 2013).

150 Ende der 1970er Jahre gab es in der Bundesrepublik Deutschland den Plan, eine staatliche Vorratshaltung einzurichten. Die Lagerhaltung von Chrom, Mangan, Vanadium, Kobalt und Blausäure sollte mit Unterstützung der Kreditanstalt für Wiederaufbau auf ein Jahr bei den Firmen ausgedehnt werden. Die Zinsen (geschätzt vierhundert Millionen DM) wollte der Bund übernehmen. Das Projekt wurde aufgrund von Sparplänen später nicht realisiert.

waltung bevorratet werden. Der deutsche Staat – oder bei einer europäischen Lösung die EU – würde damit ins Rohstoffgeschäft einsteigen und aktiv zur Steigerung der Versorgungssicherheit beitragen. Ein solches Modell kommt beispielsweise in den USA zum Einsatz.¹⁵¹ Festzulegen wäre, wie und an wen die staatlichen Metallreserven im Fall einer knappen Versorgungslage ausgeben werden würden. Denkbar wäre, dass strategisch wichtige Industriebereiche (beispielsweise bei Seltene-Erden-Magneten Erbauer von Offshore-Windkraftanlagen, bei Platinmetallen nur industrielle Anwendung und keine Schmuckherstellung) mit hohem Verbrauch bevorzugt von der strategischen Reserve profitieren könnten. Hierbei könnte man sich daran orientieren, welche Industriesektoren von der letzten Rohstoffkrise besonders hart getroffen wurden.

Nachteil dieser Art der Lagerhaltung wäre, dass der Staat mit Steuermitteln einen Teil der Aufgaben der Wirtschaft übernehme, die die mit dem Rohstoffhandel verknüpften wirtschaftlichen Entscheidungen in aller Regel schneller und effizienter umsetzen kann als der Staat. Anders als beim Erdöl, bei dem man mit hoher Gewissheit davon ausgehen kann, dass es in den nächsten Jahren und Jahrzehnten wirtschaftsstrategisch wichtig bleibt, können einzelne Metalle durch technologische Weiterentwicklungen innerhalb weniger Jahre ihre Bedeutung verlieren, während der Bedarf an anderen Metallen wächst. Die Gefahr, die falschen Metalle für die Lagerhaltung auszuwählen, wäre beim Staat sicherlich größer als bei einem Unternehmen, das seinen eigenen zukünftigen Bedarf natürlich besser einschätzen kann.

Da die Lagerhaltung teuer ist,¹⁵² würde der Staat ein erhebliches wirtschaftliches Risiko eingehen. Gleichzeitig könnte die Bereitschaft der Industrie geschmälert werden, selbst genügend vorzusorgen. Dadurch würde der Effekt der Lagerhaltung reduziert werden.

Generell stellt sich dabei die Frage, ob und unter welchen Umständen eine staatliche Beteiligung an der Lagerhaltung aus volkswirtschaftlicher Sicht gerechtfertigt ist. Wie in Abschnitt Strategische Rohstoffpolitik: Welche Rolle kann der Staat spielen? diskutiert, stellt ein physischer Lieferengpass, beispielsweise verursacht durch Exportverbote, ein echtes Marktversagen dar. Stark schwankende Preise hingegen sind nicht unbedingt Ausdruck von Marktversagen, sondern drücken lediglich eine hohe Unsicherheit bei der Preisfindung aus.

Eine staatliche Lagerhaltung zur Abfederung von Hochpreisphasen würde also kein Marktversagen im eigentlichen Sinne korrigieren, sondern vielmehr einen Mechanismus zur Preisglättung zur Verfügung stellen. Hierbei kauft der Staat in Niedrigpreisphasen physisch Rohstoffe auf und lagert diese. In Hochpreisphasen werden die Rohstoffe dann an die Privatindustrie zu Preisen unterhalb der dann herrschenden Marktpreise weitergegeben. Sofern diese Preise die Kosten für die ursprüngliche Rohstoffbeschaffung, die Lagerhaltung, Verwaltung, Versicherung etc. und die entgangenen Zinsgewinne bei anderweitiger Kapitalverwendung kompensieren, ist diese Maßnahme zwar für den Staat kostenneutral darstellbar. Das Risiko besteht allerdings darin, dass der Einkauf der Roh-

151 DLA 2016.

152 Der Wert eines Jahresverbrauches in Deutschland beträgt bei den potenziell kritischen Elementen Tellur und Indium sowie den potenziell kritischsten Seltenen-Erden-Elementen Neodym, Dysprosium und Praseodymium nach Expertenmeinung in Summe circa siebenzig Millionen Euro. Bei den Platingruppenelementen Platin, Palladium und Rhodium hat nach Expertenmeinung ein Dreimonatsverbrauch bereits einen Wert von rund 160 Millionen Euro.

stoffe nicht zu niedrigsten Preisen stattfindet oder die Kosten für die Lagerhaltung nicht ausreichend kompensiert werden, beispielsweise dann wenn die Preise nur sehr langsam steigen und die Lagerhaltung entsprechend lange anhält oder wenn sich der Bedarf der Privatindustrie als nicht hinreichend hoch erweist.

Zweifelsohne stellen extreme Preisschwankungen die Marktteilnehmer, insbesondere solche mit Interesse an dem physischen Produkt (im Gegensatz zu spekulativen Marktteilnehmern), vor besondere Herausforderungen. In Abwesenheit eines Marktversagens ist jedoch auch hier zweifelhaft, ob Ausfallrisiken, die derzeit erfolgreich von Unternehmen getragen werden, auf den Staat beziehungsweise die Gesellschaft übertragen werden sollten. Denn der Sektor scheint sich ähnlich wie andere Sektoren mit vergleichbaren Charakteristika, etwa über Finanzinstrumente, gut absichern zu können. Ein Marktversagen beispielsweise im Sinne einer Versorgungskrise ist derzeit nicht absehbar. Die gesellschaftlichen Kosten dürften den Nutzen daher im Moment übersteigen.

Anders ist die Situation zu bewerten, wenn – zum Beispiel durch Exportverbote – physische Lieferengpässe drohen. Da in Zeiten von engen Lieferketten („Just in Time Delivery“) die Reichweite der gelagerten Rohstoffe in der Privatwirtschaft gering ist, sind die eigenen Reserven bei einem Lieferengpass rasch verbraucht. In diesem Fall sind die zu erwartenden volkswirtschaftlichen Kosten durch den Produktionsstopp hoch und ein staatlicher Eingriff in einer zielführenden Ausgestaltung könnte gerechtfertigt sein. Grundsätzlich können bi- und multilaterale Verträge und Handelsabkommen (insbesondere mit Sanktionsmechanismen) kosteneffizient einen starken rechtlichen Rahmen schaffen, um solche politisch induzierten Knappheiten zu verhindern beziehungsweise zu revidieren. Sie stellen daher eine First-Best-Option dar.

Ist dies nicht möglich, so könnte eine staatliche Lagerhaltung als „letzter Beschaffer“ („Lender of Last Resort“) die Produktionsfähigkeit temporär aufrechterhalten. Beim Aufbau einer solchen staatlichen Notreserve müssten allerdings die Verteilung der Reserven sowie der Preisfindungsmechanismus vorab festgelegt werden. Zu berücksichtigen ist zudem, dass eine solche Lagerhaltung, die nur in echten Notsituationen (also bei kompletten Lieferstopps) einspringen sollte, mit hoher Wahrscheinlichkeit verlustbringend arbeiten wird, da solche Situationen selten auftreten. Zudem kann sie nur temporär (abhängig von der Größe des Lagers) Abhilfe schaffen, jedoch nicht dauerhaft.

Da die staatliche Lagerhaltung als „physische Versicherung“ für die Privatwirtschaft fungiert, wäre auch eine umfangreiche Beteiligung der Privatindustrie über eine Art Versicherungsprämie oder den Verkauf von Optionen auf Lieferung in Krisenzeiten denkbar. Besteht nach solchen Optionen keine Nachfrage, ist davon auszugehen, dass die erwarteten Kosten eines etwaigen Lieferausfalls niedriger sein werden als die Kosten der staatlichen Bevorratung, sodass davon Abstand genommen werden sollte. Das Angebot von Optionen auf Lieferung in Notzeiten hätte zugleich den Vorteil, die Kosten der staatlichen Lagerhaltung auf die Nutznießer zu konzentrieren und diese nicht der Allgemeinheit anzulasten. Ferner kann durch die Nachfrage nach den Optionen sowohl die Auswahl der vorzuhaltenden Rohstoffe als auch deren Menge durch Beteiligung der Industrie bedarfsgerecht gesteuert werden. Unterbleibt ein solcher Steuermechanismus, besteht die Gefahr, dass die Produkte der staatlichen Lagerhaltung nicht dem Bedarf der Privatwirtschaft in Art, Menge und Qualität entsprechen.

Sollte hingegen aus staatlichen Lagern auch in Situationen verkauft werden, in denen lediglich die Preise als hoch wahrgenommen werden, so droht die

Gefahr, dass Preisspitzen und Preistäler in der jeweils aktuellen Situation falsch eingeschätzt werden und etwa bei weiter steigenden (oder fallenden) Preisen „zu früh“ verkauft (oder bevorratet) wird. Zudem droht, wie auch bei einem staatlichen Bergbauunternehmen, die Gefahr der ineffizienten Bewirtschaftung aufgrund der prinzipiellen Anreiz- und Kontrollprobleme in staatlichen Unternehmen und Organisationen.

Aufgrund der zwangsweise limitierten Größe von solchen Lagern ist daher ähnlich zweifelhaft, ob die Versorgungssicherheit auch mittelfristig überhaupt verbessert werden könnte. Ist Lagerung im größeren Umfang möglich und fällt der Betrieb der Lager einem staatlichen Unternehmen zu, gilt auch hier die nicht unerhebliche Gefahr, dass starke Anreize bestehen, Angebotsmengen bewusst knapp zu halten, um hohe Oligopolpreise zu verlangen. Dies wiederum könnte die kurzfristigen Verbesserungen bei der Versorgungssicherheit überkompensieren. Diese verschiedenen Kosten würden dann ultimativ den Steuerzahlern angelastet.

3.3 Ressourceneffizienz

Während die bisher vorgestellten Maßnahmen zur Sicherung der Rohstoffeffizienz auf der Angebotsseite ansetzen, müssen bei der Betrachtung der Rohstoffeffizienz Angebot und Verbrauch betrachtet werden, außerdem die Gewinnungsprozesse selbst. Die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen kann auch verringert werden, indem der Verbrauch reduziert wird. Eine effiziente Rohstoffgewinnung kann auch dazu beitragen, Energie- und Wasserverbrauch und andere Umweltfolgen zu verringern.

3.3.1 Exploration, Abbau und Aufbereitung

Da in der Regel zunächst diejenigen Lagerstätten genutzt werden, aus denen sich die Rohstoffe am einfachsten und kostengünstigsten gewinnen lassen, nehmen im Laufe

der Zeit die Metallgehalte in den abgebauten Lagerstätten immer weiter ab und die Erze werden komplexer in ihrer Zusammensetzung. Erkundung und Abbau der Rohstoffe werden dementsprechend technisch aufwendiger und kostenintensiver. Um den steigenden Bedarf an Hightech-Metallen in Zukunft trotzdem decken zu können, müssen die technischen Verfahren für Exploration und Abbau der Rohstoffe kontinuierlich weiterentwickelt werden. Die Gründe dafür liegen auf der Hand: Zum einen können schwer zugängliche Rohstoffvorkommen zum Teil erst durch den Einsatz neuer Fördertechnologien abgebaut werden. Ein Beispiel sind Rohstoffe aus dem Meeresbergbau (marine Rohstoffe) und andere Lagerstätten in großen Tiefen, für die geeignete Fördertechnologien noch entwickelt und getestet werden müssen. Zum anderen kann man den steigenden Kosten durch schlechtere Lagerstätten nur durch eine fortlaufende Verbesserung der Fördertechnologien entgegenwirken. Ohne eine laufende technische Optimierung wäre es nicht möglich gewesen, die realen Preise für viele Rohstoffe über die letzten hundert Jahre in etwa konstant zu halten.¹⁵³

Auch im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit sind kontinuierliche Weiterentwicklungen der technischen Verfahren notwendig. Denn: Je feinkörniger und komplexer die Erze sind, desto mehr Energie wird benötigt, um sie aufzubereiten. Ohne technische Weiterentwicklung würde der Energiebedarf immer weiter steigen, wenn zunehmend schlechtere Lagerstätten genutzt werden müssen. Der Bergbau verursacht bereits heute circa acht Prozent des Weltenergiebedarfs beziehungsweise CO₂-Ausstoßes.¹⁵⁴ Wenn jedoch Energieaufwand und CO₂-Emissionen bereits beim Abbau der metallischen Rohstoffe sehr hoch sind, relativiert sich damit auch der Vorteil der „grünen Technologien“, die

¹⁵³ Angerer et al. 2016, Abb. 3.2.2.

¹⁵⁴ Angerer et al. 2016.

aus den Metallen hergestellt werden. Das heißt, je energieintensiver die Rohstoffgewinnung am Anfang der Produktionskette ist, desto geringer ist der Umweltvorteil der Erneuerbare-Energien-Anlage.

Zu einem nachhaltigen Bergbau gehört auch Vorsorge für die Zeit nach Beendigung des Förderbetriebs. So sollte dafür Sorge getragen werden, dass sich wieder intakte Ökosysteme etablieren können, das Land wieder genutzt werden kann und keinerlei Gefahren von dem stillgelegten Bergwerk ausgehen. Da dies in der Vergangenheit nicht immer geschehen ist, gilt es auch, bestehende Bergbaufolgeschäden zu beseitigen. Eine vorbildliche Beseitigung der Spuren des Bergbaus kann zu einer größeren gesellschaftlichen Zustimmung für Bergbauprojekte („Social License to Operate“) beitragen.

Da die Metalle meist außerhalb Deutschlands abgebaut werden, betreffen die Umweltfolgen oft andere Länder. Wenn beispielsweise der Abbau von Seltenen Erden in China für den Einsatz von Windkraftanlagen in Deutschland zu massiven Umweltschädigungen in China führt, dann relativiert sich der ökologische Nutzen der Anlagen erheblich.¹⁵⁵ Das Gleiche gilt auch für andere Regionen, in denen mit einfachen technologischen Mitteln unter hohem Energieaufwand Rohstoffe gefördert werden, die anschließend in den westlichen Industriestaaten genutzt werden.

Handlungsoptionen, um die Rohstoffgewinnung kosteneffizienter und umweltverträglicher zu machen, liegen zum einen in der Förderung von **Forschung und Entwicklung** für effizientere Technologien. Zum anderen kann die Politik dazu beitragen, dass **effiziente Technologien auch weltweit zum Einsatz kommen**.

¹⁵⁵ Yang et al. 2013.

Die größten Potenziale, neue Lagerstätten zu entdecken, liegen in der Tiefe. **Neue Explorationsverfahren** können helfen, diese Vorkommen zu erschließen. Für tiefliegende Vorkommen werden Systeme entwickelt, mit denen elektromagnetische Signale mehrere hundert Meter tief in den Boden eindringen können (zum Beispiel Audiofrequenzmagnetik). Die derzeitigen Verfahren ermöglichen Eindringtiefen von rund 600 Metern. Künftig sollen die Signale in bis zu 1.000 Meter tiefe Gesteinsschichten eindringen können.¹⁵⁶

Wie auch in anderen Industriesektoren werden im Bergbau die Verfahren der **Robotisierung und Vernetzung** mittlerweile stärker genutzt. Dadurch können Kosten eingespart werden.¹⁵⁷ In Zukunft könnten zunehmend ferngesteuerte Bergbaumaschinen zum Einsatz kommen, die an Stellen vordringen können, die für Menschen zu gefährlich wären. Einige Fachleute gehen davon aus, dass die Bergwerke der Zukunft an der Oberfläche weitgehend unsichtbar, vollautomatisiert, hoch effizient, umweltfreundlich und zudem menschenleer sein werden.¹⁵⁸

Der **Verbrauch von Süßwasser** kann reduziert werden, indem brackisches oder salziges Wasser genutzt wird. Die **Klimabilanz** von Bergbauunternehmen ließe sich verbessern, indem die Produktion an das schwankende Angebot von Strom aus Sonne und Wind angepasst würde. Denkbar ist, dass Unternehmen gezielt preisgünstigen überschüssigen Wind- und Solarstrom einsetzen, um Erze mit besonders niedrigen Metallgehalten aufzubereiten.¹⁵⁹

¹⁵⁶ Angerer et al. 2016

¹⁵⁷ McKinsey 2015-2.

¹⁵⁸ Lieberwirth 2015; Arvidsson 2005. Im Flussspat-Bergwerk Niederschlag erfolgt schon heute ein großer Teil der Aufbereitung unter Tage (Sächsisches Oberbergamt 2014).

¹⁵⁹ Schon heute arbeiten viele Tagebaue mit zwei Erzhalften unterschiedlicher Qualität, um auf schwankende Rohstoffpreise zu reagieren.

Im Rahmen der **bilateralen Entwicklungszusammenarbeit** könnte Deutschland zu einer weltweiten Förderung eines energieeffizienteren und ökologischeren Bergbaus beitragen. Ziel ist es, dass Deutschland dabei eine globale Vorbildfunktion einnimmt und technologische Unterstützung in den Partnerländern leistet, zum Beispiel durch die Förderung energetischer Effizienzmaßnahmen im Bergbau.

Verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz in den Bereichen Erkundung, Abbau, Aufbereitung und Wiedergewinnung von Rohstoffen werden bereits im Rahmen des Forschungsförderprogramms *r⁴ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe* sowie in der deutschen *High-tech-Strategie*¹⁶⁰ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung genannt. Folglich ist die effiziente Rohstoffgewinnung nicht nur ein technisches, sondern auch ein zentrales politisches Thema. Durch den steigenden Rohstoffbedarf wird Ressourceneffizienz in Zukunft immer wichtiger. Die Politik kann hier einen wichtigen Beitrag leisten. Sie kann zum einen die Entwicklung energieeffizienter und umweltschonender Technologien fördern und zum anderen den Einsatz dieser Technologien international stärken. Dadurch könnten gerade in Entwicklungsländern die ökologischen Folgen des Bergbaus minimiert werden.

3.3.2 Nutzung in Industrie und Haushalten

Die Effizienz der Nutzung von Rohstoffen kann im Wesentlichen in zwei Bereichen erhöht werden: zum einen bei den Endverbrauchenden, die durch ihre Kaufentscheidungen den Bedarf an Geräten (zum Beispiel Autos, Mobiltelefone) bestimmen, und zum anderen in der Industrie, wo über die Produktionsverfahren der Rohstoffbe-

darf für der Herstellung der Geräte beeinflusst werden kann.

In der Industrie kommen in erster Linie technische Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz sowie Substitutionsmaßnahmen infrage. Von Materialeffizienz spricht man, wenn bei einem Produkt das verbrauchte Material in einem effizienten (sparsamen) Verhältnis zum Nutzen steht. Bei der Substitution wird ein Material oder Element durch ein anderes ersetzt (Materialsubstitution). Ein möglicher Grund dafür ist, dass bestimmte Materialien teurer oder schwieriger zu beschaffen sind. So werden zum Beispiel in der Automobilindustrie bei bestimmten Komponenten Permanentmagnete mit Seltenen Erden (Neodym-Eisen-Bor-Verbindung) durch Ferritmagnete ersetzt. Diese sind zwar leistungsschwächer, kommen aber ohne Seltene Erden aus.¹⁶¹

Der Einfluss der Privatverbraucher auf den Rohstoffbedarf ist vor allem ein gesellschaftliches Thema. Jeder Konsument nutzt in der Regel zahlreiche Elektro- und Elektronikgeräte, die viele metallische Rohstoffe enthalten. Die derzeitigen Konsummuster führen dazu, dass die Nutzungsdauer von Elektrogeräten immer kürzer wird.¹⁶² Durch Änderungen des Konsumverhaltens kann also jeder Verbraucher zu einem sparsamen Umgang mit Rohstoffen beitragen (weniger Geräte kaufen; rohstoffeffizientere und gut recycelbare Technik kaufen; Geräte bis zum Ende ihrer Lebensdauer nutzen und gegebenen-

¹⁶¹ ERECON 2015, S. 26.

¹⁶² Verstärkt wird dieser Effekt nicht nur durch medial verbreitete Konsummuster, sondern zusätzlich durch eine Produktionskultur, die mehr auf Masse als auf Klasse beziehungsweise langlebige Qualität setzt. Immer wieder steht dabei auch der Vorwurf der „geplanten Obsoleszenz“ im Raum, bei dem die Industrie bewusst materialspezifische Schwachstellen in ihre Produkte einbaut, damit diese schneller kaputtgehen und schneller ersetzt werden müssen (UBA 2016).

falls reparieren lassen¹⁶³; aussortierte, noch funktionsfähige Geräte verschenken oder verkaufen).

Der Politik steht eine Reihe von Instrumenten zur Verfügung, um ein nachhaltiges Konsumverhalten zu fördern. Dazu zählen unter anderem Informationskampagnen, Eingriffe in die Entscheidungsarchitektur¹⁶⁴, Einflüsse auf die Produktpreise (zum Beispiel durch Steuern) und ordnungspolitische Maßnahmen, also Verbote oder Anordnungen.¹⁶⁵

Ein mögliches „hartes“ Instrument des Staates, um die Rohstoffnutzung effizienter zu gestalten, ist eine **Ressourcensteuer**. Sowohl in der Wissenschaft¹⁶⁶ als auch der Politik¹⁶⁷ hat diese Idee Verfechterinnen und Verfechter und wird immer wieder diskutiert. Indem die Energie- und Primärressourcen mit einem bestimmten Prozentsatz besteuert werden, sollen die Preise stabilisiert und der Ressourcenverbrauch der Wirtschaft insgesamt verringert werden. Dies soll zum einen die Umwelt schonen und zum anderen Anreize für die Entwicklung einer fortschrittlicheren Kreislaufwirtschaft schaffen.

Als weiteres Argument für die Ressourcensteuer wird hervorgehoben, dass die Umweltkosten in den Rohstoffpreisen nicht enthalten sind, die Preise also niedriger sind als die tatsächlichen volkswirtschaftlichen Kosten, die durch die Rohstoffgewinnung und Nutzung verursacht werden. Durch eine Rohstoffsteuer könnten diese

externen Kosten eingepreist werden.¹⁶⁸ Im Vereinigten Königreich, Dänemark und Schweden werden beispielsweise aus diesem Grund Ressourcensteuern auf primäre Baurohstoffe erhoben und haben dort im Zusammenspiel mit weiteren Politikmaßnahmen dazu beigetragen, dass mehr Recycling-Baurohstoffe verwendet werden.¹⁶⁹

Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass es in Bezug auf den Wert der Rohstoffe eine Hierarchie gibt. Im Sinne der Energiewende sind Energierohstoffe höherwertig als die Massenrohstoffe für die Bauindustrie. So könnte eine Steuer auf Baurohstoffe am Ende der Hierarchie dazu führen, dass Gebäude weniger gut isoliert werden, da sie Gebäudeisolierung relativ zu Energieverlusten verteuert. Im schlimmsten Fall kann die Steuer also dazu führen, dass Baurohstoffe durch einen Mehreinsatz von Energierohstoffen substituiert werden. Dies wäre im Sinne des Klimaschutzes kontraproduktiv. Ob dieser Fall eintritt, hängt unter anderem von den geltenden bautechnischen Anforderungen ab.

Obwohl das Ziel einer weniger ressourcenabhängigen Wirtschaft als solches begrüßenswert ist, ist die tatsächliche Lenkungswirkung einer Ressourcensteuer für metallische Rohstoffe umstritten. Grundsätzlich entwickeln sich Rohstoffpreise zyklisch, was bedeutet, dass die Preise nach einer bestimmten Zeit wieder steigen und fallen (Preisvolatilität). Das heißt, dass die Entscheidung für eine Ressourcensteuer die Gesamtbreite der Preisschwankungen berücksichtigen muss, wenn sie zu einer Preisstabilisierung führen soll. Bisher sind jedoch alle Preisstabilisierungsmaßnahmen auf dem Rohstoffmarkt (zum Beispiel Zinn- oder Kautschukabkommen¹⁷⁰)

163 Konzepte wie das „Fairphone“, die auf möglichst transparente Herstellungsprozesse setzen und bei denen die verbauten Komponenten modular ausgetauscht werden können, sind sinnvolle Ansätze, um den Materialeinsatz zu verbessern und die Lebensdauer elektronischer Geräte zu verlängern.

164 Ein Beispiel für die Entscheidungsarchitektur, um Recycling zu fördern, sind Sammelbehälter an Orten, die der Verbraucher ohnehin aufsucht, zum Beispiel in Drogeriemärkten, Supermärkten oder Bäckereien.

165 Einen Überblick über verschiedene verbraucherpolitische Maßnahmen in Bezug auf die Energiewende gibt Renn 2015.

166 Weizsäcker 2016.

167 Bündnis 90/Die Grünen 2015.

168 Meyer 2012.

169 Meyer 2012.

170 Bei diesen Abkommen wurde versucht, über Exportquoten und einen Stockpile, der antizyklisch Käufe und Verkäufe tätigen wollte, die Preise zu stabilisieren (Gocht 1983, S. 168–175).

fehlgeschlagen. Auch die Idee im Rahmen des *Integrierten Rohstoffprogrammes* der Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung (United Nations Conference on Trade and Development) für eine Reihe von Rohstoffen zu versuchen, Preise zu stabilisieren, wurde nach dem Scheitern des Zinnabkommens 1985 nicht weiter verfolgt.¹⁷¹

Zudem werden erfahrungsgemäß bedeutende Durchbrüche bei Materialeinsparungen meist in Zeiten sehr hoher Rohstoffpreise, wie zum Beispiel des Preispeaks bei den Seltenen Erden 2010/11, erreicht. Eine „mäßige“ Besteuerung von Ressourcen würde daher wahrscheinlich keinen signifikanten Einspareffekt erzielen.¹⁷² Eine Steuer, die hoch genug ist, um auch in Phasen niedriger Marktpreise Ressourceneffizienz anzureizen, würde aber insbesondere in Zeiten hoher Marktpreise die Wirtschaft sehr stark belasten.

Wenn die Steuer in erster Linie zum Ziel hat, die Umweltkosten der Rohstoffgewinnung einzupreisen, wäre eine Steuer pro Tonne Rohstoff wenig zielgenau. Denn die Umweltfolgen der Gewinnung eines Rohstoffs können sich von Bergwerk zu Bergwerk erheblich unterscheiden. Eine Ressourcensteuer müsste zudem global erhoben werden. Ansonsten entstünden Nachteile für einzelne Nationen, speziell für exportorientierte Länder wie Deutschland. Angesichts der unterschiedlichen Interessen zwischen Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländern sowie ungeklärter Zuständigkeiten auf internationaler Ebene ist die Einigung auf eine globale Ressourcensteuer zurzeit unwahrscheinlich.

3.4 Internationale Rohstoffpolitik

Internationale Rohstoffpolitik verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele:

- die eigene rohstoffverbrauchende Industrie bei der Rohstoffsicherung im Ausland zu unterstützen sowie
- die weitweiten Rahmenbedingungen zu verbessern, indem offene und transparente Märkte geschaffen und einheitliche, hohe Umwelt- und Sozialstandards im Bergbau und der Aufbereitung der Rohstoffe etabliert werden.

Instrumente, um diese Ziele zu erreichen, können auf bilateraler und multilateraler beziehungsweise globaler Ebene ansetzen.

3.4.1 Globale Ansätze

Hinsichtlich einer umwelt- und sozialverträglichen Rohstoffgewinnung sind für Deutschland als Rohstoffimporteur vor allem die Bedingungen außerhalb des Landes maßgebend. Auf multilateraler Ebene wurden in der Vergangenheit zahlreiche ordnungspolitische Optionen erwogen, wie mit Rohstoffen besser, gerechter und nachhaltiger umgegangen werden kann. Zu diesen Ansätzen zählen:

- **Steuerung durch internationale Sachverständigengremien:** zum Beispiel International Resource Panel des United Nations Environment Programme (2007)
- **Entwicklung eines globalen Rohstoffrechts:** zum Beispiel Neukonzeption der World Trade Organization (WTO)-Abkommen, Regulierung von „Common Pool Resources“ (2005), überregionale Regulierung der Ressourcennutzung (International Institute for Sustainable Development)
- **Nachhaltigkeitsstrategien:** zum Beispiel Sustainable Development Roadmap for the WTO (2009)

¹⁷¹ Gocht et al. 1988, S. 198–200.

¹⁷² So konnte beispielsweise für Benzin „Für längere Zeiträume und Zeitreihen [...] kein signifikanter Einfluss des Preises auf die Kraftstoffnachfrage nachgewiesen werden“ (Hautzinger/Mayer 2004, S. 177).

- **Globale Rohstoffverwaltung:** zum Beispiel in Form eines internationalen Metall-Covenants¹⁷³ über eine „Materialverantwortung“ („Materials Stewardship“)¹⁷⁴
- **Globale Umwelt- und Sozialstandards in der Rohstoffindustrie:** zum Beispiel The International Council on Mining and Metals (ICMM) (2001)
- **Steuerung durch Transparenz:** zum Beispiel Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) (2002); „Publish What You Pay“ (2002)

Angesichts der hohen wirtschaftlichen Bedeutung von Rohstoffen sowohl für die Produzenten- als auch für die Importländer wäre eine globale Einigung zum Umgang mit Rohstoffen und einheitlich hohen Umwelt- und Sozialstandards sicherlich sehr wünschenswert. Die Ansätze einer globalen Ressourcenpolitik haben sich aber bisher insgesamt als wenig beziehungsweise nicht durchsetzungsfähig erwiesen. Angesichts der verschiedenen, derzeit unvereinbaren Interessen von Staaten und Unternehmen sowie dem Fehlen einer globalen supranationalen Rechtssetzungs- und Kontrollinstanz wird es auf absehbare Zeit keine globale Ressourcenpolitik geben.

Auch auf EU-Ebene sind die Interessen der Mitgliedstaaten zu heterogen. Da die Mitgliedstaaten und deren Unternehmen Konkurrenten auf den Rohstoffmärkten sind, ist eine koordinierte Politik zur gemeinsamen Rohstoffsicherung schwierig zu realisieren. Obwohl eine europäische Rohstoffstrategie und verschiedene Initiativen und Einzelmaßnahmen in den letzten Jahren auf den Weg gebracht worden

sind¹⁷⁵, ist eine gemeinsame europäische Rohstoffpolitik in nächster Zeit nicht zu erwarten.

Im Rahmen der EU-Handelspolitik setzt sich Deutschland auf bi- und multilateraler Ebene für die Beseitigung von Handelshemmnissen und Wettbewerbsverzerrungen ein. Mithilfe der Welthandelsorganisation wurden zum Beispiel erfolgreiche Klageverfahren gegen China aufgrund seiner diskriminierenden Exportpolitik bei metallischen Rohstoffen eingeleitet.¹⁷⁶ Die Streitschlichtungsverfahren auf WTO-Ebene sind jedoch langwierig und wirken auch im Erfolgsfalle nur unzureichend als rechtliches Absicherungsinstrument bei ausländischen Rohstoffvorhaben. Als flankierender Rahmen verlieren multilaterale Abkommen dennoch nicht ihre Bedeutung. Sie verkörpern das langfristige Ziel eines weltweiten gerechten und nachhaltigen Umgangs mit Rohstoffen. Hierbei wäre ein Ausbau des kontinuierlichen Monitorings von globalen Wettbewerbsverzerrungen, wie es ansatzweise bei der OECD und der EU bereits durchgeführt wird, besonders hilfreich.

3.4.2 Bilaterale Ansätze

Ein weniger umfassender, aber praktikablerer Ansatz sind **bilaterale Rohstoffabkommen und Rohstoffpartnerschaften** im Rahmen der nationalen Rohstoffpolitik. Bilaterale Abkommen können den Zugang zu Lagerstätten im Ausland für die Industrie erleichtern und dazu beitragen, die benötigten Metallrohstoffe in ausreichenden Mengen zu bezahlbaren Preisen zu beziehen. Sie sind schneller implementierbar als größere multilaterale Abkommen und daher zumindest kurz- bis mittelfristig eher erfolgsversprechend. Zusätzlich zur Stabilisierung der Rohstofflieferbeziehungen können dadurch weitere gemeinsame Ziele der beteiligten Länder verfolgt werden, zum Beispiel Arbeitsplatz-

173 Covenants sind privatrechtliche Verträge, die zwischen öffentlichen Stellen und rohstoffverarbeitender Industrie abgeschlossen werden. Neben verbindlichen Zielvorgaben, die zwischen den Beteiligten ausgehandelt werden, enthalten sie Sanktionsmechanismen bei Nichterreichung der Ziele als Möglichkeiten zur Anpassung der Inhalte bei veränderten Rahmenbedingungen.

174 Bleischwitz 2009, S. 154.

175 EC 2008, EC 2010, EC 2011, EC 2014-5.

176 WTO 2014.

sicherheit, Ressourcen- und Klimaschutz und Rohstoffeffizienz. Bilaterale Rohstoffpartnerschaften eignen sich in der Regel jedoch nur für Länder, die gewisse gemeinsame Interessen haben, da die Abkommen ansonsten nur schwer umzusetzen sind.

Deutschland hat bereits drei bilaterale Rohstoffpartnerschaften (Mongolei 2011, Kasachstan 2012, Peru 2014) und eine Kooperationsvereinbarung (Chile 2013) geschlossen. Die Rohstoffpartnerschaften verfolgen das Ziel, Rohstoffe aus den Partnerländern für die deutsche Wirtschaft zu sichern und gleichzeitig die Kooperation im Industrie- und Technologiebereich zu stärken. Die Etablierung nachhaltiger Umwelt- und Sozialstandards in den Partnerländern spielt ebenfalls eine Rolle.

Die vertraglichen Vereinbarungen lassen sich jedoch nicht immer problemlos umsetzen, wie das 2011 geschlossene Rohstoffabkommen mit der Mongolei¹⁷⁷ beispielhaft zeigt. So haben deutsche Firmen bislang keine größeren Investitionen im mongolischen Bergbausektor getätigt. Dies ist auch künftig nicht zu erwarten, da insbesondere die politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen für ausländische Unternehmen (Rechtsunsicherheit, ineffiziente Bürokratie, Regelungen für ausländische Fachkräfte¹⁷⁸) nach wie vor ungünstig sind. Hinzu kommt, dass die Infrastruktur in der Mongolei mangelhaft ist und das Land weit entfernt von Häfen liegt. All dies erschwert die Förderung und den Handel mit Rohstoffen.

Rohstoffabkommen können immer nur ein flankierendes Unterstützungsange-

bot für die Industrie darstellen, konkrete Lieferverträge und -konditionen müssen die Unternehmen selbst aushandeln. Damit die staatlichen Maßnahmen Wirkung zeigen, müssen sie von der Industrie angenommen werden. Eine Voraussetzung für ihre Wirksamkeit ist, dass die Industrie sich generell in der Rohstoffsicherung engagieren will. Zudem müssen die Rohstoffabkommen gut auf die Bedürfnisse der Unternehmen zugeschnitten sein.

3.4.3 Zentraler Ansprechpartner für Rohstofffragen

Das Beispiel Mongolei zeigt auch, dass die Abstimmung zwischen Politik und Wirtschaft verbessert werden muss, damit die politischen Vereinbarungen aufgrund des Fernbleibens der Wirtschaft nicht weitgehend wirkungslos bleiben. Um die Rohstofffragen zwischen Politik und Wirtschaft zukünftig stringenter zu fokussieren und zu organisieren, wäre **ein zentraler Ansprechpartner für Rohstofffragen** eine Möglichkeit. Denkbar wäre zum Beispiel die **Einrichtung des Postens eines Staatssekretärs beziehungsweise einer Staatssekretärin oder eines Beauftragten auf Staatssekretärebene für Rohstofffragen**. Diese Ansprechperson könnte die verschiedenen politischen Zuständigkeitsbereiche effizienter als bisher zusammenführen und deutsche Rohstoffinteressen im Ausland mit Nachdruck vertreten. Als zentraler Ansprechpartner könnte er bei rohstoffstrategischen, aber auch bei Umwelt- und Sozialfragen auf eine engere Abstimmung mit der Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen hinwirken. Auch auf europäischer Ebene könnte dadurch die Kooperation zwischen den EU-Mitgliedstaaten in Rohstofffragen gestärkt werden.

3.4.4 Transparenzmechanismen

Bei vielen Rohstoffen sind die globalen Produktions- und Lieferketten oft intransparent. Gerade bei Rohstoffen aus Konfliktgebieten, in denen bewaffnete Gruppen vom Abbau und Handel profitie-

¹⁷⁷ Rohstoffabkommen Mongolei 2011.

¹⁷⁸ Laut Artikel 43.1 des Minerals Law of Mongolia (Fassung vom 30.10.2006) dürfen nur bis zu zehn Prozent ausländische Mitarbeiter in einer in der Mongolei registrierten Firma beschäftigt sein. Überschreitet die Mitarbeiterzahl diese Zehn-Prozent-Quote, muss das Unternehmen für jede weitere ausländische Mitarbeiterin oder jeden weiteren ausländischen Mitarbeiter jeden Monat den zehnfachen monatlichen Mindestlohn an den Staat zahlen (The Minerals Law of Mongolia 2006).

ren, ist schwer nachzuvollziehen, woher sie eigentlich stammen und unter welchen Bedingungen sie gefördert und verarbeitet wurden. Unternehmen, die ihre Rohstoffe aus Krisengebieten beziehen, unterstützen damit indirekt die Geschäfte von Rebellen und korrupten Regierungen – zum Nachteil der lokalen Bevölkerung.

Um Unternehmen stärker in die Pflicht zu nehmen und Handels- und Produktionsprozesse offenzulegen, sind **verbindliche Transparenzmechanismen** ein geeignetes politisches Instrument. Dazu hat es in den vergangenen Jahren auf internationaler Ebene bereits eine Reihe von Initiativen¹⁷⁹ gegeben, die verschiedene Rohstoffe umfassen und auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen.

Die zurzeit wichtigste Transparenzinitiative bei den metallischen Rohstoffen ist der im Jahr 2010 in den USA verabschiedete *Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act* (kurz: Dodd-Frank Act).¹⁸⁰ Artikel 1502 des Dodd-Frank Act verlangt von Unternehmen, die an der US-Börse notiert sind, einen jährlichen Bericht darüber, ob ihre Produkte „Konfliktmineralien“¹⁸¹ aus der Demokratischen Republik Kongo (DR Kongo) und/oder den Nachbarstaaten enthalten. Das Ziel ist es, die Lieferketten von Unternehmen transparenter zu machen

und zu mehr Verantwortung und Sorgfalt im Rohstoffhandel beizutragen. Durch das Risiko eines Reputationsverlusts sollen Unternehmen auf diese Weise bewegt werden, künftig keine Rohstoffe mehr aus den Konfliktgebieten in Zentralafrika zu beziehen. Dadurch soll die Finanzierung bewaffneter Gruppen durch den illegalen Mineralienhandel eingedämmt werden.

Die bisherige Bilanz des Dodd-Frank Act wird unterschiedlich bewertet. Einige sehen das Gesetz positiv, da in der Folge die globalen Lieferketten ein Stück weit transparenter geworden sind. Zudem habe sich der Einfluss bewaffneter Gruppen in einigen Bergbauregionen der DR Kongo verringert, was zu einer teilweisen Verbesserung der Sicherheitslage in diesen Regionen geführt hat.¹⁸² Inwiefern dies allerdings allein auf den Dodd-Frank Act zurückzuführen ist oder von anderen Faktoren abhängt, ist nicht eindeutig zu klären. Kritiker verweisen hingegen darauf, dass das Gesetz bisher nicht den beabsichtigten Effekt erzielt hat und teilweise sogar kontraproduktiv wirkte, da ausländische Unternehmen aufgrund der Sorge um Reputationsverlust weniger Rohstoffe aus der DR Kongo bezogen, wodurch zahlreiche Kongolesen ihre Arbeitsplätze im Bergbau verloren haben.¹⁸³ Zudem sei die Dokumentation der Unternehmen über die Herkunft der Rohstoffe in ihren Produkten nach wie vor mangelhaft.¹⁸⁴ Obwohl mit dem Dodd-Frank Act ein wichtiger erster Schritt getan wurde, wird es noch einige Jahre dauern, bis man den Effekt genauer einschätzen und bewerten kann.

In der EU wird ebenfalls an einer einheitlichen Regelung gearbeitet, um die Einfuhr bestimmter Mineralien und Metalle¹⁸⁵ aus sogenannten „Konflikt- und

179 Eine der bekanntesten ist der Kimberley-Prozess, der seit 2003 den Handel mit sogenannten „Blutdiamanten“ mithilfe staatlicher Herkunftszertifikate unterbinden soll. Die Initiative wird von Staaten, internationalen Nichtregierungsorganisationen und der Diamantenindustrie getragen und erfasst nach eigenen Angaben mehr als 99 Prozent der globalen Rohdiamantenproduktion (Kimberley Process 2016). Die Effizienz dieses Systems wurde jedoch in den letzten Jahren von Beobachtern wie der internationalen Nichtregierungsorganisation Global Witness infrage gestellt, da es Regelungslücken aufweist und die tatsächliche Umsetzung zu sehr von den teilnehmenden Staaten abhängt und nur schwer von unabhängigen Stellen überprüft werden kann (Global Witness 2010; Global Witness 2013).

180 Dodd-Frank Act 2010.

181 Laut Dodd-Frank Act, Artikel 1502 sind „Konfliktmineralien“ definiert als Columbit-Tantalit (Niob-Tantal) oder Coltan, Kassiterit (Zinn), Gold, Wolframit oder deren Derivate (Dodd-Frank Act 2010, Artikel 1502, S. 2218). Oft werden sie zusammengefasst als Tantal, Wolfram, Zinn und Gold.

182 Dranginis 2016.

183 Wolfe 2015.

184 Wipperfurth 2015.

185 EC 2014-4.

Hochrisikogebieten“¹⁸⁶ durch europäische Unternehmen transparenter zu gestalten und zertifizieren zu können. Genau wie beim Dodd-Frank Act sollen damit die illegalen Rohstoffgeschäfte bewaffneter Gruppen unterbunden werden und mehr Sorgfalt¹⁸⁷ und Transparenz bei der Rohstoffeinfuhr erreicht werden. Diskutiert wird eine verbindliche Zertifizierung von Tantal, Wolfram, Zinn und Gold aus Konfliktgebieten für alle EU-Unternehmen. Auch die Unternehmen im nachgelagerten Teil der Lieferkette, die keine Rohstoffe aus Konfliktgebieten importieren, jedoch Tantal, Wolfram, Zinn und Gold in ihren Produkten verwenden, müssen über

die Herkunft der Mineralien und Metalle in ihren Lieferketten Informationen einholen. Lediglich Importeure sehr kleiner Mengen (beispielsweise Zahnärzte) sind von den Informationspflichten ausgenommen. Insgesamt würde die Regelung etwa 880.000 Unternehmen betreffen.¹⁸⁸ Die EU-Konfliktmineralien-Verordnung wurde 2016 verabschiedet. Während sowohl die EU-Verordnung als auch der Dodd-Frank Act in erster Linie darauf abzielen, die Finanzierung bewaffneter Gruppen durch den Rohstoffhandel einzuschränken, hat der International Council of Mining & Metals eine Verbesserung der Umwelt- und Sozialstandards in der Bergbau- und Metallindustrie zum Ziel. Im ICMM haben sich große internationale Bergbauunternehmen zusammengeschlossen. Etwa dreißig bis vierzig Prozent der weltweiten Produktion werden nach dessen Standards gefördert.¹⁸⁹

¹⁸⁶ Laut EU-Kommission werden Konflikt- und Hochrisikogebiete als Gebiete definiert, „in denen bewaffnete Konflikte geführt werden oder die sich nach Konflikten in einer fragilen Situation befinden, sowie Gebiete, in denen Staatsführung und Sicherheit schwach oder nicht vorhanden sind“. Anders als beim Dodd-Frank Act, dessen geografischer Anwendungsbereich auf die DR Kongo und deren Nachbarstaaten beschränkt ist, gilt der EU-Entwurf für alle Konfliktgebiete der Welt (EC 2014-3, S. 13).

¹⁸⁷ Bei den Sorgfaltspflichten orientiert man sich an den Leitlinien zur Sorgfaltspflicht der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD 2013).

¹⁸⁸ EP 2015.

¹⁸⁹ Angerer et al. 2016.

Transparenzinitiativen	Jahr	Ziele
International Council of Mining & Metals	2001	Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Bergbau- und Metallindustrie
Extractive Industries Transparency Initiative	2002	Erhöhung der Transparenz internationaler Finanzströme von Staaten und Unternehmen im Rohstoffsektor*
Kimberley-Prozess	2003	Unterbindung des Handels mit Rohdiamanten über staatliche Herkunftszertifikate
Conflict-Free Sourcing Initiative/ Conflict-Free Smelter Program	2008	Informationen für Unternehmen zu Metallhütten, die „konfliktfreie“ Rohstoffe verarbeiten
Dodd-Frank Act, Artikel 1502	2010	Einschränkung des illegalen Handels mit Konfliktmineralien von bewaffneten Gruppen durch Offenlegungspflichten für Unternehmen
Aluminium Stewardship Initiative	2012	Erhöhung von Transparenz und Nachhaltigkeit in der Aluminiumindustrie
EU-Verordnung zu Konfliktmineralien	Geplant 2017	Erhöhung der Transparenz der Lieferketten von europäischen Unternehmen durch die Zertifizierung von Rohstoffimporten aus Hochrisiko- und Konfliktgebieten

Tabelle 1: Beispiele vorhandener Transparenzinitiativen im Rohstoffsektor¹⁹⁰

* Deutschland hat im Dezember 2015 den Antrag auf Mitgliedschaft in der EITI eingereicht (BMWi 2015-2).

¹⁹⁰ Eine ausführlichere Übersicht über Transparenzinitiativen befindet sich in Angerer et al. 2016, Abb. 3.19.

Wie die Erfahrung mit bestehenden Initiativen zeigt, ist die konsequente Umsetzung von entscheidender Bedeutung. Erst wenn die Regularien rechtsverbindlich sind, keine Lücken aufweisen und die Einhaltung überwacht sowie bei Missachtung sanktioniert wird, können sie mittel- bis langfristig die gewünschte Wirkung entfalten. Bei freiwilligen Selbstverpflichtungen besteht die Gefahr, dass die Standards verwässert, unterlaufen oder gänzlich missachtet werden. Sanktionen können von Reputationsverlusten über Geldstrafen hin zu Einfuhrverboten reichen. Ein wirksames Monitoring kann nur durch eine unabhängige Prüfungsinstanz gewährleistet werden. Die Einbeziehung von Nichtregierungsorganisationen und gesellschaftlichen Akteuren kann die Durchsetzung der Standards auf eine breitere und gesellschaftlich stärker legitimierte Basis stellen.

Bei der Einführung von Transparenzmechanismen müssen jedoch auch die Kosten und mögliche Nebeneffekte berücksichtigt werden. Die Umsetzungskosten variieren je nach Aufwand. Vor allem für kleine und mittlere Bergbaufirmen ist es häufig problematisch, Transparenzmechanismen finanziell umzusetzen. Dabei werden überproportional große Umweltschäden oft von mittelgroßen oder kleinen Bergbauunternehmen verursacht, die nur einen geringen Anteil an der Weltproduktion haben und sich nicht an Standards halten.¹⁹¹ Auch negative Auswirkungen für die lokale Wertschöpfung in den Bergbauregionen, etwa der am Beispiel des Dodd-Frank-Index beschriebene Verlust von Arbeitsplätzen, sollten nach Möglichkeit im Vorfeld abgeschätzt und die Folgen abgemildert werden.

191 Angerer et al. 2016.

4 Handlungsoptionen: Energierohstoffe

Kurz- bis mittelfristig müssen in Deutschland – auch wenn die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik weiterhin zügig ausgebaut wird – Verbrennungskraftwerke bereitgehalten werden, um eine sichere Versorgung zu gewährleisten. Denn solange es keine Langzeitspeicher für Strom gibt, sind sie die einzig verfügbare Technologie, um mehrwöchige Perioden mit wenig Wind und Solarstrahlung zu überbrücken. Perspektivisch werden diese Kraftwerke aber mit weniger Vollbenutzungsstunden laufen, also weniger Brennstoff verbrauchen. Auch im Wärme- und Mobilitätssektor wird Energie heute zum allergrößten Teil durch Brennstoffe bereitgestellt. Neben den fossilen Energieträgern wird zunehmend auch Bioenergie eingesetzt.

4.1 Biomasse als Energiequelle

Brenn- und Kraftstoffe aus Biomasse¹⁹² haben eine relativ hohe Energiedichte¹⁹³ und sind im Gegensatz zu Wind- und Sonnenenergie gut speicherbar. Sie können für alle Sektoren, also Strom, Wärme und Verkehr, flexibel eingesetzt werden. In Deutschland tragen sie zum Kraftstoffverbrauch im Verkehr ungefähr fünf Prozent bei, beim Wärmeverbrauch sind es ungefähr zehn Prozent und bei der Bruttostromerzeugung ungefähr sieben Prozent.¹⁹⁴ Ein ähnliches Bild ergibt sich für die weltweite

Energieversorgung.¹⁹⁵ Da Biomasse sowohl in Deutschland angebaut als auch aus einer Vielzahl an Ländern importiert werden kann, kann sie zur Diversifizierung der Bezugsquellen für Brennstoffe und damit zur Versorgungssicherheit beitragen.

Um seine langfristigen Klimaziele zu erreichen, setzt Deutschland weiter auf Bioenergie im Energiemix. Gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 wird Bioenergie in der künftigen Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen und soll in allen drei Nutzungspfaden „Wärme“, „Strom“ und „Kraftstoffe“ weiter ausgebaut werden. Auch in nahezu allen aktuellen Energieszenarien wird davon ausgegangen, dass Bioenergie im Jahr 2050 einen ähnlichen Beitrag zur Stromerzeugung leisten wird wie heute.¹⁹⁶ Im Verkehrssektor könnte ein Verzicht auf Bioenergie die Umstellung auf erneuerbare Energien sogar noch stärker erschweren als in der Stromerzeugung,¹⁹⁷ wenn es nicht gelingt die Treibhausgas(THG)-Emissionen im Verkehrsbereich durch andere Maßnahmen wie den Ausbau des öffentlichen Verkehrs zu verringern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Treibhausgasbilanz von Biokraftstoffen im Vergleich zu anderen biogenen Energieträgern oft ungünstiger ist.¹⁹⁸

192 Dazu zählen gasförmige und flüssige Energieträger wie Biogas, Biodiesel und Bioethanol aus Mais beziehungsweise Raps sowie feste Brennstoffe (zum Beispiel Holz).

193 Das bedeutet, sie haben pro Kilogramm oder Kubikmeter einen hohen Energieinhalt, liefern also Energie in „kompakter Form“.

194 AEE 2014-2.

195 IEA 2014.

196 In 62 analysierten Szenarien beträgt der Bioenergieanteil an der Stromversorgung Deutschlands 2050 zwölf bis achtzig Terawattstunden (zwei bis 14 Prozent des Stromverbrauchs). 2013 betrug er 48 Terawattstunden (acht Prozent) (Elsner et al. 2015).

197 Vgl. u. a. Henning/Palzer 2015; Gerhardt et al. 2015.

198 Creutzig et al. 2015, WBGU 2009.

Es gibt jedoch eine Reihe von Argumenten gegen die energetische Nutzung von Biomasse:

- Biomasse wird auch als Nahrungs- und Futtermittel sowie für die stoffliche Nutzung, das heißt die Herstellung etwa von Kunststoffen, Baumaterial und Chemikalien benötigt. Da das Biomassepotenzial durch die Verfügbarkeit von Anbaufläche, Bodenqualität, Wasser und Nährstoffen begrenzt ist, stehen die unterschiedlichen Nutzungspfade oft in Konkurrenz zueinander.¹⁹⁹
- Die Verwendung von Biomasse als Energiequelle ist nur unter bestimmten Umständen CO₂-neutral, nämlich wenn sie entweder aus zusätzlichem und nachhaltig bewirtschaftetem Pflanzenwachstum stammt oder Biomasse verbrannt wird, die – würde sie nicht energetisch genutzt – biologisch abgebaut würde.²⁰⁰ Darüber hinaus führt die intensive Landwirtschaft²⁰¹ zu THG-Emissionen (hauptsächlich Lachgas) sowie zu Biodiversitätsverlusten, erhöhtem Wasserverbrauch und Gewässerkontamination durch überschüssige Nährstoffe aus Düngemitteln.²⁰² Auch die Bodenqualität kann sich verschlechtern.²⁰³ Zudem kann eine steigende Nachfrage nach Bioenergie zur Rodung von Wäldern und den damit verbundenen THG-Emissionen führen.²⁰⁴ Abbildung 4 zeigt schematisch

die Ströme an Kohlenstoff- und Treibhausgasemissionen, die im Lebenszyklus der Bioenergie auftreten.

- Im Vergleich zur Wind- und Solarenergie trägt Bioenergie in der Regel weniger zur Reduzierung der Treibhausgase bei.²⁰⁵ Zudem weist sie zumeist höhere Vermeidungskosten²⁰⁶ pro Tonne CO₂ auf.
- Bioenergie hat eine geringere Flächeneffizienz. Pro Hektar Landfläche ist die Ausbeute an Energie bei Biomasse geringer als bei Wind- und Solarenergie.²⁰⁷ Auch die energetische Effizienz ist in vielen Fällen geringer.²⁰⁸

²⁰⁵ Solange die Energie, die zur Herstellung der Anlagen benötigt wird, aus fossilen Energieträgern stammt, ist streng genommen keine Art von erneuerbarer Energie vollkommen CO₂-frei. Strom aus Windkraftanlagen verursacht vier bis elf Gramm CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde (g/kWh), Strom aus Photovoltaik 55 bis 63 g/kWh, Strom und Wärme aus Holz etwa 15 bis 25 g/kWh. Bei agrarischer Bioenergie sind die Werte jedoch meist wesentlich höher, zum Beispiel 202 bis 472 g/kWh für Strom aus einem Biogas-Blockheizkraftwerk betrieben mit Maissilage (Werte aus Fritsche 2013, UBA 2014-2 und Ökoinstitut 2010). Zum Vergleich: Die CO₂-Emissionen aus einem modernen erdgasgefeuerten Kraftwerk betragen 350 g/kWh, aus einem Braunkohlekraftwerk etwa 1000 g/kWh (Schäuble et al. 2014). Bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen werden alle Treibhausgase in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Lachgas (N₂O) hat beispielsweise ein CO₂-Äquivalent von 265. Das heißt, die Treibhauswirkung von einem Kilogramm Lachgas entspricht derjenigen von 265 Kilogramm CO₂. Die durch Stickstoffdüngung verursachten Lachgasemissionen tragen bei agrarischer Bioenergie zu der teilweise relativ schlechten THG-Bilanz bei.

²⁰⁶ THG-Vermeidungskosten bezeichnen die Kosten, die entstehen, um gegenüber dem bestehenden System oder einem Referenzsystem eine Tonne CO₂ einzusparen.

²⁰⁷ Leopoldina 2013, S. 23.

²⁰⁸ Als Indikator für die energetische Effizienz von Energiewandlungstechnologien dient der „Energy Return on Investments“ (EROI). Dies ist die Energie, die über die gesamte Lebensdauer einer Anlage gewonnen wird, geteilt durch die Energie, die benötigt wird, um die Anlage herzustellen, zu errichten und zu betreiben. Der EROI gibt also an, wie oft die hineingesteckte Energie wieder herausgeholt wird. In Deutschland ist bei unmittelbar genutztem Strom der EROI von Photovoltaik (EROI = 7) und vor allem Windkraft (EROI = 18) und Wasserkraft (EROI = 100) demjenigen von Bioenergie (EROI < 5) weit überlegen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei einer Vollversorgung aus Wind- und Photovoltaik ein Teil des Stroms in Langzeitspeichern eingelagert werden müsste. Durch die Wirkungsgradverluste der Speicherung würde der EROI dabei deutlich absinken.

¹⁹⁹ Zum Beispiel Lambin/Meyfroidt 2011.

²⁰⁰ Plevin et al. 2010.

²⁰¹ Bei der intensiven Landwirtschaft wird der Ernteertrag pro Fläche maximiert, zum Beispiel durch Bewässerung und die Verwendung von Mineraldüngern und Pflanzenschutzmitteln. Bei der extensiven Landwirtschaft sind die Eingriffe in den Naturhaushalt wesentlich geringer, die Ernteerträge pro Fläche aber geringer.

²⁰² Newbold et al. 2015 (Biodiversität); Kraxner et al. 2013 (Emissionen, Wasser, Düngemittel und Biodiversität); BMUB 2014; UBA 2011; UBA 2014-1.

²⁰³ UBA 2011.

²⁰⁴ Searchinger et al. 2008; Fargione et al. 2008; Havlik et al. 2011.

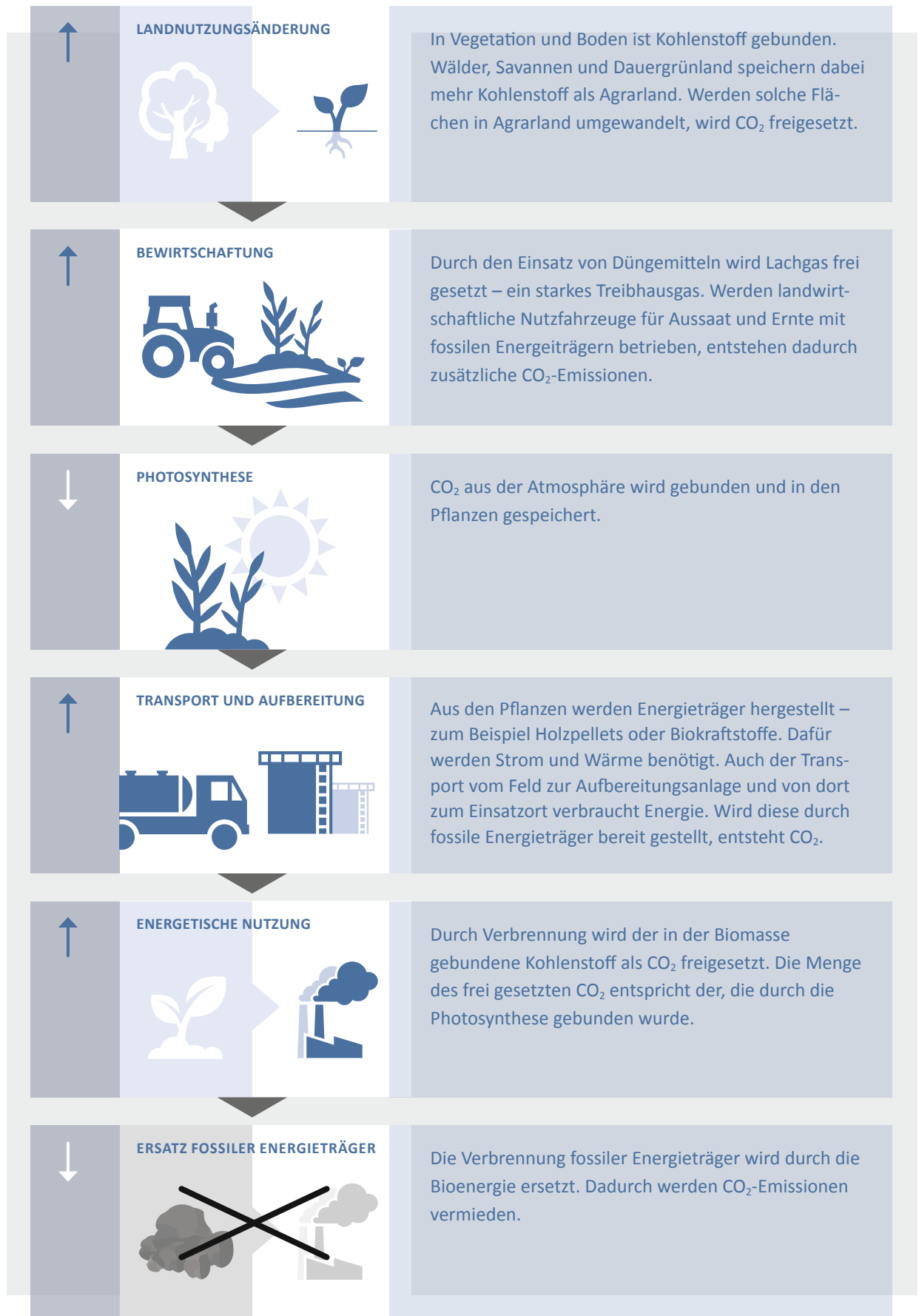


Abbildung 4: Für die Treibhausgasbilanz von Bioenergie muss der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden. Die Treibhausgasemissionen sind von Fall zu Fall sehr unterschiedlich und teils schwierig zu erfassen. Die weiße Pfeile zeigen an, wann CO₂ gebunden wird, die blauen Pfeilen, wann CO₂ freigesetzt wird.

Die Schätzungen, wie groß das nachhaltig nutzbare globale Bioenergiepotenzial tatsächlich ist, gehen sehr weit auseinander. Die Zahlen für das Jahr 2050 reichen von weltweit fünfzig (heutiger Bioenergieverbrauch) bis 500 Exajoule pro Jahr.²⁰⁹ Dabei sind die großen Abweichungen auf unterschiedliche Annahmen zurückzuführen, etwa im Hinblick auf die Steigerung der pflanzlichen Erträge, die für die Landwirtschaft zur Verfügung stehenden Flächen, künftige Technologien und Managementsysteme oder die für die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung erforderlichen agrarischen und tierischen Produkte.

Die Erträge in der Landwirtschaft hängen auch von der Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen ab und können durch Düngung wesentlich gesteigert werden. Von den benötigten Düngemitteln ist lediglich Phosphat nicht unbegrenzt verfügbar. Bei einem konstanten Verbrauch auf heutigem Niveau würden die bekannten Reserven zwar etwa für die nächsten dreihundert Jahre ausreichen.²¹⁰ Es gibt jedoch auch weniger optimistische Abschätzungen.²¹¹

Aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte und des hohen Lebensstandards vereinnahmt Deutschland derzeit jährlich dreißig bis vierzig Prozent mehr Biomasse für Ernährung, stoffliche Nutzung und energetische Zwecke als lokal nachwächst und ist daher auf erhebliche Biomasseimporte angewiesen. Deutschland nimmt also in großem Ausmaß Landflächen außerhalb der eigenen Landesgrenzen in Anspruch. Mit dem Import werden die mit der Nutzung von Biomasse zu energetischen Zwecken verbundenen möglichen Probleme exportiert. Von der insgesamt in Deutschland vereinnahmten Biomasse werden jährlich

ungefähr zehn Prozent energetisch genutzt. Etwa die Hälfte davon ist Holz, die anderen fünfzig Prozent verteilen sich auf Biogas, Biodiesel und Bioethanol.²¹²

In der Gesamtschau gilt es also, die positiven Auswirkungen des Ersatzes fossiler Rohstoffe²¹³ und des Beitrags zur Versorgungssicherheit gegen mögliche negative ökologische und soziale Konsequenzen der Bioenergienutzung abzuwägen. In diesem Zusammenhang gewinnt auch die Frage der Akzeptanz in der Bevölkerung für Bioenergie zunehmend an Bedeutung. So werden Biogasanlagen auf lokaler Ebene weniger befürwortet als Windkraft- und Solaranlagen.²¹⁴ Die energetische Nutzung von Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern sowie von überschüssigen agrarischen Abfällen wird dagegen allgemein akzeptiert, da sie meist umwelt- und klimafreundlich ist und nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht.²¹⁵ Allerdings steht die energetische Nutzung von Waldholz teilweise auch in Konkurrenz zu Anforderungen des Naturschutzes, wie der Erhöhung des Totholzanteils und der Einrichtung von Wildnisgebieten.

Im Folgenden werden Handlungsoptionen dargestellt, wie Bioenergie für die Energiewende möglichst nachhaltig bereitgestellt und genutzt werden kann.

4.1.1 Reduktion der ökologischen Folgen und der Nahrungsmittelkonkurrenz

Die intensive Landwirtschaft hat es ermöglicht, dass heute über sieben Milliarden Menschen auf der Erde leben. Obwohl es genug Landflächen für die Ernährung aller Menschen gibt, sind derzeit allerdings fast eine Milliarde unterernährt. Durch eine wachsende Weltbevölkerung und

209 Smith et al. 2014.

210 Angerer et al. 2016; BGR 2013, USGS 2015, Scholz et al. 2014.

211 Vgl. Leopoldina 2013.

212 Leopoldina 2013.

213 Auch wenn durch Landnutzungsänderungen, Anbau (insbesondere Düngung), Ernte und Transport der Biomasse THG-Emissionen freigesetzt werden, so können diese geringer sein als bei der Verbrennung fossiler Energieträger (Sterner/Fritsche 2011).

214 AEE 2014-1.

215 Wald: Leopoldina 2013; Abfall: UBA 2010, S. 56.

steigenden Fleischkonsum in sich entwickelnden Ländern wird eine ausreichende Ernährung für alle Menschen in Zukunft eher schwieriger werden. Die Produktion von agrarischer Biomasse als Energiequelle konkurriert global gesehen mit der Nahrungsmittelproduktion um Landflächen und kann daher die Ernährungssituation weiter verschärfen. Lokal kann der Anbau von Bioenergie aber auch zu mehr Wohlstand führen.

Eine intensive Landwirtschaft ist mit erheblichen Treibhausgasemissionen in Form von Distickstoffmonoxid (Lachgas) und/oder Methan verbunden. So verursacht die intensive Landwirtschaft acht Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland. Weltweit sind es sogar zwanzig Prozent. Dagegen sind Wälder in der Regel Emissionssenken, weshalb die weltweit fortschreitende Entwaldung etwa drei Gigatonnen CO₂ pro Jahr in die Atmosphäre freisetzt.²¹⁶ Außerdem verringert die intensive Landwirtschaft die Artenvielfalt, kontaminiert Gewässer und verknappt Trinkwasser, sie entzieht den Böden wichtigen Kohlenstoff und verstärkt deren Erosion. Im Falle der Biodiversitätsverluste, unserer Eingriffe in den Stickstoffkreislauf und des anthropogenen Klimawandels dürften die Grenzen der ökologischen Belastbarkeit der Erde bereits überschritten sein.²¹⁷ Die ökologischen Folgen der intensiven Landwirtschaft gelten für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion (82 Prozent der Agrarflächen in Deutschland) ebenso wie für den Anbau von Energiepflanzen (15 Prozent) wie Raps oder Mais. Einige der im Folgenden diskutierten Lösungsansätze adressieren explizit nur den Energiepflanzenanbau, während andere auf die Landwirtschaft als Ganzes abzielen. Die vorgestellten Handlungsoptionen sind Bausteine für eine nachhaltigere Landwirtschaft, die sowohl einzeln wie auch in Kombination eingesetzt werden können.

²¹⁶ Smith et al. 2014, S. 819–828.

²¹⁷ Rockström et al. 2009, S. 32.

Staatliche Förderung auf Bioenergie aus Abfällen und nachhaltig angebautem Holz beschränken

Am einfachsten wäre es, Bioenergie nur dann staatlich zu fördern, wenn sie aus Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern, aus agrarischen und tierischen Abfällen (zum Beispiel Gülle²¹⁸, Stalldung, Essensresten) sowie aus pflanzlichen Reststoffen (Lignocellulose-Anteilen) hergestellt wurde. Bioenergie aus Pflanzen wie Mais und Raps wäre ohne staatliche Förderung – wie zum Beispiel die Einspeisevergütung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) oder Vorgaben wie einen gesetzlichen Mindestanteil von Biokraftstoffen am gesamten Kraftstoffabsatz²¹⁹ – meist nicht mehr konkurrenzfähig, wodurch Flächen für den ökologischen Landbau frei werden und die Nahrungsmittelkonkurrenz entfallen würde.

Es müsste allerdings definiert werden, was nachhaltig bewirtschaftete Wälder und was Rest- und Abfallstoffe sind. Zu berücksichtigen ist auch, dass Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern nicht unbedingt CO₂-neutral ist.²²⁰ Trotzdem dürften Monitoring und Vollzug einfacher sein als bei der Einbeziehung der Landwirtschaft in den Emissionshandel (siehe unten). Die Einschränkung der Förderung wäre wahrscheinlich relativ einfach in das derzeitige Regelsystem in Deutschland zu

²¹⁸ Die Bildung von Biomethan aus Gülle und Dung erfolgt nur stabil, wenn diesen eine gewisse Menge pflanzlicher Biomasse hinzugefügt wird. Die Vergärung von Gülle und Dung in einer Biogasanlage hat den zusätzlichen Vorteil, dass die THG-Emissionen bei der Ausbringung des Gärrestes als Wirtschaftsdünger niedriger sind als bei der unvergärten Ausbringung (UBA 2013; Biogasrat 2012).

²¹⁹ Biokraftstoffquotengesetz 2006; Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen 2009.

²²⁰ Aus forstwirtschaftlicher Sicht ist ein Wald nachhaltig bewirtschaftet, wenn der Holzbestand nicht abnimmt. Es wird allerdings derzeit in der Wissenschaft kontrovers diskutiert, inwieweit damit auch die CO₂-Bilanz neutral ist (vgl. zum Beispiel Bright et al. 2012, Cherubini et al. 2012, Haberl et al. 2013-1, Holtsmark 2013, Schulze et al. 2012).

integrieren.²²¹ Im EEG 2014 wird dies bereits umgesetzt: Im Gegensatz zum EEG 2012 gibt es keine einsatzstoffbezogene Vergütung mehr für Mais, Zuckerrüben und Getreide. Hierdurch wird der Ausbau im Wesentlichen auf Anlagen zur Nutzung von Gülle und Abfallstoffen begrenzt. Auch die Nachhaltigkeitskriterien der EU für Biokraftstoffe sehen vor, dass nach 2020 nur noch Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation staatliche Förderung erhalten, die aus den Cellulose/Hemicellulose-Anteilen von Pflanzen, agrarischen Abfällen oder Algen gewonnen werden.²²²

Allerdings würde durch diese Maßnahme das Potenzial an Bioenergie stark eingeschränkt. Wenn es nicht gelingt, dies durch andere erneuerbare Energien oder eine Reduzierung des Energieverbrauchs auszugleichen, werden mehr fossiler Energieträger eingesetzt. Außerdem werden keine Anreize gesetzt, Abfälle entlang der Wertschöpfungsketten zu vermeiden. Durch die selektive Förderung von Bioenergie aus Abfällen würden sogar Fehlanreize entstehen, durch ineffiziente Verarbeitung von Biomasse größere Abfallmengen entstehen zu lassen.

Einbeziehung der Landwirtschaft in den Emissionshandel

Bisher sind die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft in Deutschland nicht in den Emissionshandel einbezogen, und damit auch nicht die von agrarischen Energiepflanzen, obwohl dies im Kyoto-Protokoll vorgesehen war. Eine Einbeziehung wäre wahrscheinlich das effektivste Mittel, die Treibhausgasemissionen der intensiven Landwirtschaft einzugrenzen. Allerdings geht die Einbeziehung laut einer Studie des Umweltbundesamtes „mit erheblichen

Herausforderungen für das Monitoring und den Vollzug“²²³ einher und dürfte daher nicht kurzfristig umsetzbar sein. Insgesamt ist die Umsetzung marktbasierter Instrumente in der Landwirtschaft schwierig.²²⁴ Vor allem, um negative Folgen indirekter Landnutzungsänderungen zu vermeiden und wenn Marktversagen vorliegt (zum Beispiel bezüglich der Finanzierung von Innovationen), sind wahrscheinlich zusätzliche Instrumente erforderlich.

Im Vergleich zum bestehenden Emissionshandelssystem, das große Punktquellen wie Kraftwerke und Zementfabriken beinhaltet, ist die Erfassung der THG-Emissionen für die Landwirtschaft ungleich komplexer. So lassen sich Emissionen aus dem Landnutzungswandel und aus Böden, die großflächig und teilweise zeitverzögert anfallen, nur schwer quantifizieren und einem Verursacher zuordnen. Auch unterscheiden sich die Methoden, um landwirtschaftliche Emissionen zu ermitteln, in ihrer Genauigkeit und ihrem Aufwand. So werden die Emissionen aus der Nutztierhaltung anhand der Zahl und Art der gehaltenen Nutztiere abgeschätzt und die aus dem Ackerbau anhand der verwendeten Mengen Stickstoffdünger und dem Düngemanagement. Je nach Methode werden die hohen Genauigkeitsanforderungen des bestehenden europäischen Emissionshandels für die Landwirtschaft kaum erreicht.²²⁵ Nach der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union von 2013 werden teilweise schon einige Parameter erhoben, auf die man hierbei zurückgreifen könnte.²²⁶

Volkswirtschaftlich gesehen ist ein gut funktionierender Emissionshandel eine dynamisch effiziente Maßnahme für den Klimaschutz, das heißt, er kann das vorgegebene Emissionsziel zu minimalen Kosten

²²¹ Bei einer Anpassung der Regelungen in Deutschland sind allerdings die Vorgaben der EU zu beachten, unter anderem die Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie). Diese legt fest, dass zehn Prozent des Energieverbrauchs im Verkehr und 18 Prozent des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland durch erneuerbare Energien gedeckt werden müssen.

²²² EC 2016-2.

²²³ UBA 2013.

²²⁴ Grosjean et al. 2016.

²²⁵ UBA 2013.

²²⁶ EC 2015.

erreichen.²²⁷ Dem können allerdings hohe Transaktionskosten entgegenwirken. Da in der Landwirtschaft viele Betriebe erfasst werden müssten und das Monitoring aufwendig ist, würden die Transaktionskosten die Betriebe vergleichsweise stärker belasten, als es in der Energiewirtschaft und Industrie der Fall ist.²²⁸ Kleinere Betriebe würden dabei relativ stärker belastet als größere. Mehr als ein Drittel aller landwirtschaftlichen Emissionen entfällt allerdings auf die größten zehn Prozent der Betriebe.²²⁹ Das heißt, ein Großteil der Emissionen könnte schon eingespart werden, wenn man den Emissionshandel auf Landwirte einer bestimmten Größe konzentrieren würde.²³⁰

Der Emissionshandel würde voraussichtlich bewirken, dass Bioenergie aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern sowie pflanzlichen und tierischen Abfall- und Reststoffen gegenüber Bioenergie aus speziell dafür gezüchteten Feldpflanzen (beispielsweise Soja, Mais und Raps) einen Wettbewerbsvorteil erhält und dadurch verstärkt genutzt würde. Zudem könnte er dazu führen, dass sich die landwirtschaftliche Praxis verändert hin zu Bewirtschaftungsmethoden mit geringeren Treibhausgasemissionen, wie dem ökologischen Landbau oder der Präzisionslandwirtschaft.²³¹ Durch den geringeren Einsatz von Stickstoffdünger und Pestiziden könnten solche Bewirtschaftungsformen neben dem Klimaschutz auch zum Gewässerschutz und zum Erhalt der Artenvielfalt

beitragen. Allerdings treten diese positiven Nebeneffekte nur dann ein, wenn im Landwirtschaftssektor andere Bewirtschaftungsformen angereizt werden. Werden die Emissionsberechtigungen hingegen aus anderen Sektoren (Industrie, Energie) zugekauft, bleiben sie aus. Daher kann man sich nicht darauf verlassen, dass der Emissionshandel andere Umweltprobleme in der Landwirtschaft automatisch mit löst.

Die Erträge pro Fläche sind bei einer weniger intensiven Landwirtschaft meist deutlich geringer.²³² Daher würden zunächst mehr Flächen für die Nahrungsmittelproduktion benötigt und weniger für Bioenergie zur Verfügung stehen. Dem wirkt allerdings entgegen, dass tierische Lebensmittel, deren Produktion einen deutlich höheren Flächenbedarf pro Kalorie hat²³³, aufgrund der Emissionsabgaben teurer werden dürften, wodurch sich eine Verschiebung der Nachfrage hin zu pflanzlichen Lebensmitteln ergeben kann. Dies würde den Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion insgesamt wiederum verringern. Die Gesamtauswirkung dieser gegenläufigen Effekte auf die verfügbare Fläche für Bioenergie und die ökologischen Folgen der Landwirtschaft ist jedoch schwer quantitativ abzuschätzen.

Ob der Emissionshandel letztlich zu einer umweltfreundlicheren landwirtschaftlichen Praxis führt, oder ob lediglich Emissionsberechtigungen aus anderen Sektoren hinzugekauft werden, hängt vom

²²⁷ acatech 2015, S. 6.

²²⁸ UBA 2013.

²²⁹ Grosjean et al. 2016.

²³⁰ Eine Studie des Umweltbundesamtes untersucht verschiedene Methoden, wichtige Quellen von THG-Emissionen aus der Landwirtschaft in den Emissionshandel einzubeziehen, im Hinblick auf Wirksamkeit, Vereinbarkeit mit dem EU-EHS und Transaktionskosten. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die detaillierte Erfassung von Emissionen aus der Intensivtierhaltung in Großbetrieben und die Abschätzung der Lachgasemissionen auf Basis des Düngemiteleinsatz geeignete Verfahren sind (UBA 2013).

²³¹ Zielgerichtete Bewirtschaftung des Bodens, bei der Unterschiede des Bodens und der Ertragsfähigkeit innerhalb eines Feldes für Saat, Düngung und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln berücksichtigt werden.

²³² Beispielsweise betrug in einem für Deutschland repräsentativen Testbetriebsnetz im Wirtschaftsjahr 2014/15 der Ertrag für Weizen aus ökologischem Landbau 372 Tonnen pro Hektar, im konventionellen Betrieb durchschnittlich 838 Tonnen pro Hektar (BMEL 2015, S. 24).

²³³ Beispielsweise wird für die Erzeugung von Protein aus Fleisch sechs bis 17 Mal so viel Land benötigt wie für die gleiche Menge an Protein aus Sojaerzeugnissen (Joyce et al. 2012). Umgerechnet pro Nahrungsmittelkalorie ist das Verhältnis ähnlich.

Preis der CO₂-Zertifikate ab.²³⁴ Schätzungen in der Fachliteratur zu den Treibhausgas-Minderungskosten und -potenzialen in der Landwirtschaft weisen eine hohe Bandbreite auf.²³⁵

Andere Studien schlagen vor, gegebenenfalls zunächst ein **separates Emissionshandelssystem** für die Landwirtschaft einzurichten.²³⁶ Dies ist zwar volkswirtschaftlich zunächst ineffizienter als ein kombiniertes Emissionshandelssystem für alle Sektoren, würde aber sicherstellen, dass emissionsmindernde Maßnahmen in der Landwirtschaft durchgeführt werden (anstatt Zertifikate aus anderen Sektoren zu kaufen) und damit die oben beschriebenen positiven Effekte einer weniger intensiven Landwirtschaft für Artenvielfalt und Gewässerschutz mit sich bringen. Den zusätzlichen Kosten stünde also ein zusätzlicher Umweltnutzen gegenüber. Ein separates Emissionshandelssystem könnte aber auch wegen der „ungenaueren“ Emissionserfassung sinnvoll sein. Der Handel zwischen den beiden Emissionshandelssystemen könnte innerhalb bestimmter Grenzen erlaubt²³⁷ und sukzessiv ausgeweitet werden bis hin zu einer Zusammenführung der beiden Systeme.

Um Risiken der Verlagerung von Emissionen ins Ausland (Carbon Leakage) und Wettbewerbsverzerrungen zwischen einheimischer (beziehungsweise europäischer) und importierter Biomasse zu vermeiden, sollten die landwirtschaftlichen Emissionen weltweit bepreist werden. Bis zu einer globalen Implementierung eines Emissionshandels für landwirtschaftliche Emissionen müssten bei Importen die

Vorkettenemissionen auf geeignete Weise angerechnet werden. Dies ist zum Beispiel möglich, indem importierte Biomasse anhand von Nachhaltigkeitskriterien zertifiziert werden muss.

Der in der EU stark subventionierte landwirtschaftliche Sektor wäre bei einer Einführung des Emissionshandels von den Veränderungen in der Einkommensverteilung betroffen. Der Widerstand der Landwirte dagegen kann die Umsetzung erschweren oder verhindern. Dies hängt natürlich auch davon ab, wie die Emissionsberechtigungen zugeteilt werden. Auch eine transparente Umverteilung der Einkünfte aus dem Emissionshandel („Revenue Recycling“) könnte ungewünschten Verteilungseffekten entgegenwirken.

Nachhaltigkeitsvorgaben für den Energiepflanzenanbau und -import

Um die negativen Umweltfolgen der Bioenergieproduktion zu verringern, können auch Nachhaltigkeitskriterien vorgegeben werden. Neben Mindesteinsparungen an Netto-Treibhausgasemissionen gegenüber fossilen Brennstoffen können diese etwa auch Anforderungen zum Schutz der Artenvielfalt oder zum Boden- und Gewässerschutz beinhalten. Die Nahrungsmittelkonkurrenz bleibt hier in der Praxis häufig außen vor.

Vorgaben zur Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen und flüssigen Bioenergieträgern werden beispielsweise bereits in der EU umgesetzt. Neben Kriterien zum Schutz der Biodiversität müsste eine Mindesteinsparung an Treibhausgasen gegenüber fossilem Treibstoff in Höhe von derzeit 35 Prozent und ab 2017 von fünfzig Prozent erreicht werden, damit staatliche Förderung gewährt wird.²³⁸ Unbefriedigend bleibt, dass Treibhausgasemissionen aufgrund von indirekten Landnutzungsänderungseffekten dabei nicht berücksichtigt werden.

²³⁴ Da die Emissionen aus der Landwirtschaft gegenüber denen aus dem Energiesektor klein sind, hängt es eher vom Energiesektor ab, welcher Zertifikatspreis sich einstellt. Wenn die THG-Minderungskosten in der Landwirtschaft höher sind als in anderen Sektoren, so würden eher Emissionsberechtigungen zugekauft statt Emissionen reduziert werden.

²³⁵ Vermont/De Cara 2010.

²³⁶ UBA 2013.

²³⁷ UBA 2013.

²³⁸ Richtlinie 2009/28/EG.

Ein umfassendes Zertifizierungssystem könnte alle Biomasseprodukte unabhängig vom Verwendungszweck erfassen und damit auch den Import an bestimmte Nachhaltigkeitskriterien knüpfen – auch ergänzend für den Fall, dass ein Emissionshandel für landwirtschaftliche Emissionen zunächst nur europaweit etabliert wird. Alternativ könnte die Zertifizierung auf importierte Biomasse und Biomasseprodukte (Bioethanol, Biodiesel und Biogas) für energetische Zwecke beschränkt werden.

Auf Europa beschränkte Nachhaltigkeitskriterien bergen allerdings die Gefahr, dass außerhalb von Europa produzierte Biomasse, die die Nachhaltigkeitskriterien erfüllt, lediglich „umgelenkt“ wird: Wurde sie zuvor für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion verwendet, würde sie dann bevorzugt genutzt, um Bioenergie für Europa bereitzustellen. Für Nahrungs- und Futtermittel stünde schlicht weniger Biomasse aus nachhaltigem Anbau zur Verfügung und global gesehen würde die Landwirtschaft nicht nachhaltiger. Ein Entwurf für eine Ergänzung der EU-Richtlinie sieht vor, solche „indirekten Landnutzungsänderungen“ zukünftig in die Nachhaltigkeitskriterien einzubeziehen.²³⁹ Wie auch beim Emissionshandel gilt: Je mehr Länder teilnehmen und je mehr Agrarprodukte einbezogen werden, desto besser kann Carbon Leakage verhindert werden und umso wirksamer ist die Maßnahme – allerdings auch desto komplexer und schwieriger zu implementieren.

Ergänzende Maßnahmen für eine nachhaltige Landwirtschaft

Weil der hohe Einsatz von Stickstoffdünger neben den stark klimawirksamen Lachgasemissionen so viele weitere negative Umweltfolgen hat (zum Beispiel verstärktes Algenwachstum in den Gewässern, Belastung des Trinkwassers und Gefährdung der Biodiversität)²⁴⁰, könnten – auch zu-

sätzlich zum Emissionshandel – Maßnahmen zur Reduzierung des Stickstoffeintrags in die Landschaft ergriffen werden. So könnten Stickstoffüberschüsse²⁴¹ oder der Stickstoffdünger selbst besteuert werden. In Schweden und Dänemark führte eine Steuer auf den Mineraldüngerpreis zu einer deutlichen Verringerung des Mineraldüngereinsatzes. Die **Besteuerung von Stickstoffüberschüssen** in den Niederlanden hingegen erwies sich aufgrund von Messproblemen als schwierig und machte ein aufwendiges Monitoring erforderlich, das zu hohen administrativen Kosten führte.²⁴² Eine andere Möglichkeit ist ein **Handelssystem für Stickstoff**, ähnlich dem Emissionshandel, wie es in Neuseeland betrieben wird. Die höchsten Kosten ergaben sich hierbei bei der Einführung, zum Beispiel bei der Installation der Monitoring-Software, wonach die Kosten auf ein überschaubares Maß sanken.²⁴³

Landwirtschaftlich genutzte Böden können neben Lachgas erhebliche Menge an CO₂ ausstoßen.²⁴⁴ Das geschieht zum Beispiel bei der Umwandlung von Grünland in Ackerland und insbesondere bei der Entwässerung von Mooren, wobei Bodenkohlenstoff in Kohlendioxid (und teilweise auch Methan) umgewandelt wird. Weil diese Emissionen sehr schwierig zu erfassen sind, können ergänzend ordnungsrechtliche Maßnahmen dazu beitragen, die Funktion von **Böden als Kohlenstoffsenke zu erhalten** (zum Beispiel durch ein Verbot des Umbruchs von Mooren und Dauergrünland oder Auflagen für eine klimaschützende Bewirtschaftung).

²⁴¹ Die Stickstoffüberschüsse für einen Betrieb entsprechen der Differenz aus der Stickstoffzufuhr aus dem Zukauf von Düngern, Futtermitteln und Vieh und der Stickstoffabfuhr über die landwirtschaftlichen Erzeugnisse, die den Betrieb verlassen.

²⁴² UBA 2013, S. 32 f.

²⁴³ Duhon et al. 2014.

²⁴⁴ 2010 betrug die globale Nicht-CO₂-Treibhausgasemission aus landwirtschaftlichem Boden mindestens 1,5 Gt CO₂-Äquivalent. Das entspricht etwa einem Drittel der Emissionen aus der Landwirtschaft und drei Prozent der gesamten anthropogenen Emissionen (Smith et al. 2014).

²³⁹ EC 2016-2.

²⁴⁰ SRU 2015.

4.1.2 Erschließung zusätzlicher Potenziale

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Optionen zielen auf die Reduktion der Umweltfolgen des Biomasseanbaus ab, gehen aber tendenziell mit einer Verringerung des nutzbaren Bioenergiepotenzials einher. Im Folgenden werden Optionen vorgestellt, zusätzliche Bioenergiepotenziale zu erschließen.

Brachflächen und degradiertes Land für die Züchtung von Energiepflanzen nutzen

Als Energiepflanzen können auch verschiedene Gräser (zum Beispiel Chinagrass [Miscanthus], Rutenhirse (Switchgrass), Rohrglanzgras, Sorghumhirse, Gehölze wie Weide, Pappel, Eukalyptus) und Ölpflanzen (zum Beispiel Purgiernuss [Jatropha]) genutzt werden. Werden diese auf Brachflächen und degradiertem²⁴⁵ Land angebaut, entsteht keine Flächenkonkurrenz mit der Produktion von Nahrungsmitteln. Hohe Erträge werden aber auch hier nur bei intensiver Düngung und mit den damit verbundenen ökologischen Folgen erzielt. Die Potenziale solch ungenutzter Landflächen sind sehr umstritten. Einige Studien sehen ein weltweit großes Potenzial von bis zu hundert Exajoule²⁴⁶, während andere solche Schätzungen für überzogen halten und das Potenzial als sehr viel geringer einschätzen.²⁴⁷

Degradierte Flächen können aber auch zu Wäldern aufgeforstet werden. Ob die negative THG-Bilanz der Aufforstung oder der Ersatz fossiler Brennstoffe durch Bioenergie den größeren Nutzen für den Klimaschutz bringt, muss im Einzelfall sorgfältig abgewogen werden. Oft sind hier auch Kombinationen möglich, zum

Beispiel bei der Nutzung von Biomasse aus nachhaltiger Forstwirtschaft.²⁴⁸

Gräser und Gehölze können derzeit in erster Linie als Festbrennstoffe für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Zu Biokraftstoffen und Biogas lassen sie sich mit den heute verwendeten Prozessen noch nicht ökonomisch verarbeiten. Das gilt auch für die Gewinnung von Biofuels aus Algen.²⁴⁹

Energie aus Abfall ausweiten

In Deutschland ist es per Gesetz verboten, organische Abfälle zu deponieren, daher haben sich hierzulande für die meisten Biomasseabfälle bereits Nutzungsstrukturen (zum Beispiel Biogasanlagen, Kompostierung) etabliert. Teilweise könnte dennoch durch eine Kaskadennutzung zusätzliche Bioenergie gewonnen werden. Beispielsweise kann Bioabfall zunächst in einer Biogasanlage vergärt und der Gärrest im Anschluss kompostiert werden. Dies kann gegenüber der direkten Kompostierung eine bessere Treibhausgasbilanz aufweisen.²⁵⁰

Teilweise wird in Deutschland mehr Stroh auf den Feldern gelassen als für die Erhaltung des Kohlenstoffgehaltes der Böden erforderlich ist.²⁵¹ Dieses könnte energetisch genutzt werden. Allerdings hat Stroh eine relativ geringe Energiedichte und ungünstige verbrennungstechnische Eigenschaften.²⁵² Die Erzeugung von Wärme, Strom und Kraftstoffen wie Bioethanol aus Stroh ist daher in den meisten Fällen aufwendiger und teurer, als wenn andere biogene oder fossile Energieträger genutzt werden.²⁵³

245 Degradieretes Land ist für den Anbau von Feldfrüchten nicht mehr geeignet, da die Funktion des Bodens zum Beispiel durch Erosion, Versalzung aus Bewässerung, Verdichtung durch Maschinen oder Schadstoffeintrag beeinträchtigt ist. Gräser und Gehölze können darauf trotzdem teilweise gedeihen.

246 Smith et al. 2014; Nijssen et al. 2012.

247 Baka/Bailis 2014; Baka 2013; Baka 2014; Haberl et al. 2013-2; Haberl 2013.

248 Dies wurde zum Beispiel durch eine Taskforce der Internationalen Energie Agentur untersucht (IEA Bioenergy Task Force 31 2009).

249 Turkenburg 2012, S. 787.

250 Umweltbundesamt Österreich 2011.

251 Die nachhaltig energetisch nutzbare Strohmenge in Deutschland wird auf 30 bis 50 TWh pro Jahr geschätzt (Weiser et al. 2014).

252 Kaltschmitt et al. 2009.

253 DBFZ 2011.

Außerhalb Deutschlands werden immer noch organische Abfallstoffe in großem Umfang deponiert, teilweise mit erheblichen Emissionen des starken Treibhausgases Methan.²⁵⁴ Eine energetische Nutzung dieser Abfälle könnte voraussichtlich ohne negative Umweltfolgen die Bioenergiepotenziale vergrößern und darüber hinaus sogar durch die Vermeidung der Methanemissionen zum Klimaschutz beitragen.

Landwirtschaftliche Flächen für Bioenergie freisetzen

Wie viel landwirtschaftliche Fläche für energetische Zwecke zur Verfügung steht, wird in erster Linie vom Flächenbedarf für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion bestimmt. Dieser hängt ab von der landwirtschaftlichen Produktivität, von den Verlusten in der Kette vom Produzenten zum Verbraucher²⁵⁵, der Verschwendung von Nahrungsmitteln in den Privathaushalten²⁵⁶ und vom Anteil der Ernährung aus tierischen Produkten²⁵⁷, für die ein Vielfaches mehr an Fläche benötigt wird als für pflanzliche Produkte. Maßnahmen, die die Verluste in der Nahrungsmittelproduktionskette senken und eine Veränderung der Essgewohnheiten hin zu weniger Verschwendung und weniger tierischen Produkten bewirken, können daher Flächen für den ökologischen Landbau und Biomasseanbau freisetzen.

Die derzeit umfassendste Studie zur Lebensmittelverschwendung schätzt, dass in Deutschland jährlich etwa elf Millionen Tonnen Nahrungsmittel weggeworfen werden, davon etwa sechzig Prozent in

den Privathaushalten.²⁵⁸ Es ist erklärtes Ziel der Bundesregierung, diese Menge bis 2020 zu halbieren.²⁵⁹ Maßnahmen, die beim Verbraucher ansetzen²⁶⁰, können den Flächenbedarf in der Landwirtschaft also deutlich reduzieren. Belastbarere Zahlen und Studien sowie eine effektivere Vernetzung der zuständigen Akteure würden es erleichtern, den Erfolg solcher Maßnahmen zu beurteilen und sie auch einzuführen. Dafür soll die EU-Initiative Fusions den Grundstein legen.²⁶¹

In Deutschland stammen etwa 38 Prozent der Nahrungsmittelkalorien aus tierischen Produkten. Um den Konsum tierischer Produkte zu reduzieren, sind verschiedene Maßnahmen denkbar. Am leichtesten ließe sich dies durch Einbeziehung der Landwirtschaft in den Emissionshandel bewirken: Aufgrund der höheren CO₂-Emissionen²⁶² würde sich der Preis von tierischen gegenüber pflanzlichen Nahrungsmitteln erhöhen. Zusätzlich oder alternativ könnten tierische Lebensmittel stärker besteuert werden als pflanzliche Lebensmittel.²⁶³ Steuern waren jedoch bislang wenig erfolgreich, um die Ernährung zu beeinflussen. Ein Beispiel dafür ist die schnell wieder abgeschaffte Fettsteuer in Dänemark.²⁶⁴ Ferner kann das Verbraucherverhalten durch Informationskampagnen beeinflusst werden.²⁶⁵ Für geringeren Fleischkonsum lassen sich Verbraucher am ehesten gewinnen, wenn dieser als gesün-

²⁵⁴ Zum Beispiel in der Palmölproduktion (vgl. Stichnothe/Schuchardt 2010).

²⁵⁵ In der Literatur finden sich Angaben von einem Drittel (Gustavsson et al. 2011, S. 4) bis sechzig Prozent (Lundqvist et al. 2008). Einbezogen sind dabei alle Lebensmittel, die in Lagern, beim Transport, im Handel und beim Verbraucher weggeworfen werden. Ernteverluste und Verluste bei der Bereitstellung von Tierfutter sind in den Studien in unterschiedlichem Maße berücksichtigt.

²⁵⁶ Kranert et al. 2012, S. 204.

²⁵⁷ In Deutschland sind es etwa 38 Prozent (Leopoldina 2013, S. 33).

²⁵⁸ Kranert et al. 2012, S. 204.

²⁵⁹ Bundesregierung 2016.

²⁶⁰ Kampagnen zur Aufklärung der Verbrauchenden sind ein gängiges Lenkungsmittel. Sie sollen Wissen und Wertschätzung von Lebensmitteln erhöhen und damit deren Verschwendung eindämmen. Indizien sprechen für die Wirkung solcher Kampagnen, Ergebnisse belastbarer empirischer Untersuchungen stehen aber noch aus (Bundesregierung 2014-2, S. 6).

²⁶¹ Mitglieder sind unter anderem öffentliche Institutionen, Forschungseinrichtungen, Nichtregierungsorganisationen und Unternehmen (EU Fusions 2016).

²⁶² Einen Überblick über die CO₂-Emissionen der Ernährung bietet WWF 2012.

²⁶³ So wurde beispielsweise empfohlen, den reduzierten Mehrwertsteuersatz für Fleisch, Eier und Milchprodukte abzuschaffen (SRU 2015).

²⁶⁴ Reisch et al. 2013, S. 20.

²⁶⁵ Chatham House 2014.

der – und nicht als ethischer oder umweltfreundlicher – präsentiert wird.²⁶⁶ Auch über sogenannte „Nudges“, das heißt Maßnahmen, die die Entscheidungsstruktur verändern, kann das Verbraucherverhalten beeinflusst werden.²⁶⁷ Solche Maßnahmen können allerdings dann in die Kritik geraten, wenn sie als Bevormundung wahrgenommen oder dargestellt werden.²⁶⁸

Weiteres Potenzial liegt in den Sicherheitsstandards für Lebensmittel.²⁶⁹ So könnte über Lebensmittelverfallsdaten besser aufgeklärt werden und das Verfütterungsverbot von Essensresten zurückgenommen werden. Auch werden nationale Produktionsquoten als ein erfolgversprechendes Instrument diskutiert, um die Produktion tierischer Nahrungsmittel zu reduzieren.²⁷⁰

4.1.3 Gezielte Nutzung der Vorteile von Bioenergie

Wie erläutert, ist Bioenergie prinzipiell in den drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr vielseitig einsetzbar. Weil sie aber nur einen kleinen Anteil des gesamten Energiebedarfs decken kann, sollte sie gezielt dort eingesetzt werden, wo sie dem Gesamtsystem den größten Nutzen bringt.

Eine übliche Methode, verschiedene Nutzungspfade zu bewerten, ist ein Vergleich der THG-Vermeidung gegenüber dem Einsatz fossiler Energieträger. Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, dass pro Hektar Anbaufläche mit

Holz zur Strom- und Wärmeerzeugung die meisten Treibhausgase vermieden werden, während die Bilanz bei Biokraftstoffen am schlechtesten aussieht.²⁷¹ Die Bioenergie erreicht in denjenigen Nutzungspfaden die größte Emissionseinsparung, in denen sie die sehr CO₂-intensive Kohleverstromung ersetzt. Solche Studien gehen allerdings meist vom heutigen Energiesystem als Referenzsystem aus und haben daher eher eine kurzfristige Perspektive.

Langfristig kommt es aber darauf an, wie Bioenergie am sinnvollsten eingesetzt werden kann in einem Energiesystem, das durch Wind- und Solarenergie dominiert wird.²⁷² Biomasse sowie daraus hergestellte Brennstoffe haben im Vergleich zur Elektrizität aus Photovoltaik und Windturbinen den Vorteil, sich relativ leicht in großen Mengen und mit hoher Energiedichte für eine spätere Verwendung speichern zu lassen. Speicherbare Energieträger mit hoher Energiedichte werden zum Beispiel als Treibstoffe für Flugzeuge, für Lastkraftwagen und Lastschiffe benötigt, die auch in näherer Zukunft wahrscheinlich kaum mit Elektrizität betrieben werden können. Sie werden aber auch zur Stromerzeugung benötigt in den Zeiten, in denen die Sonne nicht scheint (Strom aus Photovoltaik) oder der Wind nicht bläst (Strom aus Windturbinen), will man nicht Elektrizität aus konventionellen Kraftwerken vorhalten müssen. In dieser Hinsicht ist die derzeit praktizierte kontinuierliche Verstromung von Biogas in den meisten der über 8.000 Anlagen in Deutschland in Zukunft nicht sinnvoll.²⁷³

Ein weiterer Vorteil von Bioenergie gegenüber anderen erneuerbaren Energien ist, dass sie in Kombination mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (CCS)

²⁶⁶ Joyce et al. 2012, S. 5.

²⁶⁷ Das Platzieren von Gemüse oder Salat an prominenter Stelle von Kantinen erhöht deren Konsum messbar (Reisch et al. 2013, S. 16), und allein durch kleinere Teller bei Buffets gehen weniger Essensreste zurück (in einem Projekt in Dänemark waren das 26 Prozent, vgl. iNudgeyou 2016). Wirkung zeigt es auch, wenn öffentliche Institutionen als Vorbild vorangehen und beispielsweise in großem Maßstab Lebensmittel mit geringerem tierischen Anteil einkaufen (Reisch et al. 2013, S. 21).

²⁶⁸ So wurde 2013 im Bundestagswahlkampf die Forderung nach einem wöchentlichen „Veggie-Day“ vielfach scharf kritisiert, obwohl eine Studie in sechs EU-Ländern zeigt, dass Menschen überwiegend für einen fleischfreien Tag sind (Reisch/Sunstein 2016).

²⁶⁹ Reisch et al. 2013, S. 21.

²⁷⁰ Reisch et al. 2013, S. 20.

²⁷¹ Osterburg et al. 2009, S. 95; Sterner/Fritsche 2011.

²⁷² Die meisten aktuellen Energieszenarien gehen davon aus, dass in Deutschland Wind und Photovoltaik als die kostengünstigsten und technisch ausgereiftesten erneuerbaren Energien den Großteil der Stromerzeugung übernehmen werden (Elsner et al. 2015).

²⁷³ Leopoldina 2013, S. 25 f.

Emissionen aus der Atmosphäre entfernen kann: Die Pflanzen nehmen CO₂ auf und wandeln es in energiereiche Kohlenstoffverbindungen um. Diese werden dann im Kraftwerk verbrannt und das entstehende CO₂ wird abgeschieden und unterirdisch eingelagert. Da sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bereits stark erhöht hat, können ambitionierte Klimaschutzziele nur noch erreicht werden, wenn die CO₂-Konzentration wieder gesenkt wird.²⁷⁴ **Bioenergie mit CCS (BECCS)** könnte einen Beitrag dazu leisten.²⁷⁵

Eine andere Möglichkeit, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, wäre der Einsatz **großflächiger Aufforstung**, die unter heutigen Bedingungen kosteneffizienter als BECCS ist.²⁷⁶ Da die verfügbare Landfläche begrenzt ist und es auch gegenläufige biophysikalische Effekte (zum Beispiel Veränderung der Albedo²⁷⁷) gibt, könnte dennoch langfristig eine Klimaschutzstrategie, in der sowohl Aufforstung als auch BECCS zum Einsatz kommen, zu höheren CO₂-Einsparungen führen als Aufforstung alleine.²⁷⁸ Neben BECCS und Aufforstung gibt es weitere Möglichkeiten, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, die aber größtenteils noch unzureichend erforscht sind oder deutlich geringere Potenziale aufweisen.²⁷⁹

4.1.4 Recyceln von Phosphaten als Düngemittel und Futterzusatz

Von den drei essenziellen Hauptdüngemittelstoffen Stickstoff, Kalium und Phosphor sind auf die Dauer nur die Phosphatlager-

stätten begrenzt.²⁸⁰ Für den Rohstoff Phosphor werden bis 2050 und noch darüber hinaus jedoch keine Engpässe erwartet – sofern alle Quellen genutzt werden.²⁸¹ Allerdings gibt es in Deutschland selbst keine Phosphatlagerstätten. Etwa die Hälfte des derzeit in der Landwirtschaft als Düngemittel genutzten Phosphats kann durch Gülle und Dung gedeckt werden, die andere Hälfte muss importiert werden. Außer als Düngemittel wird Phosphat in der Landwirtschaft auch als Zusatz zum Viehfutter in größeren Mengen benötigt. Weil es auch im übrigen Europa kaum Phosphatlagerstätten gibt, wird Phosphor als einer der zwanzig für die EU kritischen Rohstoffe²⁸² eingestuft – wenn auch erst für die Zukunft.

Um Engpässe in der Phosphatversorgung aus Lagerstätten frühzeitig zu erkennen, könnte ein **Monitoring-Verfahren** eingerichtet werden. Hierzu könnte auf internationaler Ebene ein ständiger Ausschuss eingerichtet werden.²⁸³

Der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft für Phosphat kann die Importabhängigkeit reduzieren und die begrenzten Lagerstätten schonen. Es gibt bereits vielversprechende Ansätze, zum Beispiel die Rückgewinnung von Phosphat aus Klärschlamm. Die Ausbeuten und die Verfahren zur Entfernung von Kontaminationen wurden in den vergangenen Jahren bereits verbessert, aber es besteht hier noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.²⁸⁴

274 Fuss et al. 2014.

275 Smith et al. 2014.

276 Humpenöder et al. 2014.

277 Die Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden, also nicht selbst leuchtenden Oberflächen.

278 Wenn der Atmosphäre über einen langen Zeitraum große Mengen an CO₂ entzogen werden müssen, ist auch zu berücksichtigen, dass die Vermeidung derselben Mengen von CO₂ durch Aufforstung größere Landflächen beanspruchen würde als BECCS (Smith et al. 2015).

279 Eine Übersicht bietet Smith et al. 2015.

280 Stickstoff und Kalium stehen im Prinzip unbegrenzt zur Verfügung, da pflanzenverfügbare Stickstoffverbindungen über das Haber-Bosch-Verfahren aus Luftstickstoff hergestellt werden und Kalium neben umfangreichen geologischen Lagerstätten auch aus Meerwasser gewonnen werden kann.

281 Angerer et al. 2016; BGR 2013; USGS 2015; Scholz et al. 2014.

282 Siehe Abschnitt Wann Rohstoffe „kritisch“ sind.

283 Wellmer/Scholz 2015.

284 Einen Überblick über sekundäre Phosphorquellen und deren Nutzung bietet zum Beispiel Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall 2012. Verschiedene in der Entwicklung befindliche Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm werden in BAM 2014, Doetsch et al. 2010 und Pinnekamp et al. 2011 dargestellt.

Neben **technischen Verfahren für die Rückgewinnung** ist es für die Etablierung effizienter Phosphatkreisläufe auch erforderlich, die Phosphornutzung durch Pflanzen besser zu verstehen.²⁸⁵

4.2 Fossile Energierohstoffe

Derzeit werden weltweit mehr als achtzig Prozent des Primärenergieverbrauchs durch die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt.²⁸⁶ Dies trifft auch auf Deutschland zu.²⁸⁷ Die Internationale Energieagentur (International Energy Agency, IEA) geht bis zum Jahr 2040 von einem steigenden Energieverbrauch aus, wobei das Wachstum nicht in Westeuropa, sondern vor allem in China sowie in verschiedenen Schwellenländern erfolgen wird.

Die Verbrennung fossiler Energieträger verursacht einen Großteil der weltweiten Treibhausgasemissionen. In Deutschland war die Energiewirtschaft im Jahr 2014 für etwa vierzig Prozent, der Verkehrssektor für 18 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen verantwortlich.²⁸⁸ Um die Klimaschutzziele einzuhalten, muss der Einsatz fossiler Brennstoffe in den nächsten Jahrzehnten deutlich reduziert werden. Bis 2050 sollen in Deutschland die CO₂-Emissionen um achtzig bis 95 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden.²⁸⁹ Auf EU-Ebene ist geplant, die Emissionen bis 2030 um vierzig Prozent verglichen mit 1990 zu reduzieren.²⁹⁰ Werden diese Ziele umgesetzt, ist langfristig also mit einem deutlichen Rückgang des Bedarfs an fossilen Energieträgern zu rechnen.

Kohle ist auf lange Sicht verfügbar und relativ kostengünstig. Allerdings verursacht dieser Brennstoff verglichen mit anderen fossilen Energieträgern die meisten CO₂-Emissionen. Pro Kilowattstunde Strom erzeugt ein Braunkohlekraftwerk fast dreimal so viel CO₂ wie ein Erdgaskraftwerk.²⁹¹ Gaskraftwerke haben zudem den Vorteil, dass sie flexibler sind als Kohlekraftwerke und daher die fluktuierende Einspeisung aus Windkraft- und Photovoltaik gut ausgleichen können. Darüber hinaus verbrennen Erdgas und Biogas deutlich sauberer als Kohle, sind aber teurer.

Bei Steinkohle, Braunkohle und Uran gibt es so große Ressourcen und Reserven, dass die Verfügbarkeit selbst bei steigendem Verbrauch langfristig gewährleistet ist.²⁹² Für die deutsche Versorgung spielt Uran aufgrund des beschlossenen Kernenergieausstiegs allerdings keine große Rolle mehr. Während die hierzulande genutzte Braunkohle aus heimischer Förderung stammt, ist der Anteil heimischer Steinkohle in den vergangenen zehn Jahren drastisch zurückgegangen und betrug im Jahr 2014 weniger als 13 Prozent.²⁹³ Mit dem Ende der Subventionierung im Jahr 2018 wird die Förderung in Deutschland eingestellt.

Erdgas aus eigenen Quellen deckte im Jahr 2014 etwa zehn Prozent des Verbrauchs in Deutschland, beim Erdöl waren es lediglich zwei Prozent. Erdöl wurde in erster Linie aus Russland, Norwegen, Großbritannien sowie aus politisch instabilen Regionen des Nahen Ostens und Nordafrikas importiert. Es ist nicht nur der teuerste Energierohstoff, sondern verzeichnet auch starke Preisschwankungen: Zwischen 2000 und 2008 stieg der Preis um mehr als das Zehnfache an. Solche Preissprünge sind allerdings in der Regel weniger durch die Förderkosten bestimmt

²⁸⁵ Die Phosphorkreisläufe in Waldökosystemen werden beispielsweise in dem DFG-Schwerpunktprogramm *SPP 1685 – Ecosystem nutrition: forest strategies for limited phosphorus resources* erforscht (Universität Freiburg 2016).

²⁸⁶ IEA 2015, S. 6.

²⁸⁷ BMWI 2016-1.

²⁸⁸ BMUB 2015.

²⁸⁹ Bundesregierung 2010, S. 4.

²⁹⁰ EC 2014-2, S. 5.

²⁹¹ BMUB 2015, S. 29.

²⁹² BGR 2015-1.

²⁹³ BMWi 2016-2.

als durch politische Entwicklungen; in der Vergangenheit etwa durch Verknappungsmaßnahmen der Organisation erdölexportierender Länder, kurz OPEC, die Kuwaitkrise oder den Irakkrieg. Auch beim Erdgas ist Deutschland von wenigen Lieferländern abhängig. Während heute noch ein Teil aus den Niederlanden stammt, wird diese Bezugsquelle aufgrund schrumpfender Reserven künftig wegfallen. Dadurch wächst die Abhängigkeit von Importen aus Russland.

Die derzeit niedrigen Preise von Erdöl und Erdgas auf dem Weltmarkt werden großenteils auf die gestiegene Förderung von sogenanntem Schieferöl und -gas in den USA zurückgeführt. Hier zeigt sich, wie radikal technische Innovationen – in diesem Fall Hydraulic Fracturing (Fracking) – die Rohstoffversorgung beeinflussen können. Selbst wenn die Förderung aus diesen Lagerstätten deutlich zunehmen sollte, sind Erdgas und Erdöl im Vergleich zu Kohle dennoch knappe Rohstoffe.²⁹⁴ Daher ist auch weiterhin – trotz des aktuellen Preisverfalls – mit hohen beziehungsweise auf lange Sicht noch steigenden Preisen für Erdöl und Erdgas zu rechnen.

Prinzipiell sind viele der Handlungsansätze für Metalle (siehe Kapitel Handlungsoptionen: Metallische Rohstoffe) auf Erdgas, Erdöl und Kohle übertragbar: Eine möglichst genaue Kenntnis der Lagerstätten, die Beobachtung der Märkte, die Diversifizierung der Bezugsquellen, die Reduzierung der Importabhängigkeit und Lagerhaltung sowie eine sparsamere Verwendung können auch hier zu einer sicheren Versorgung beitragen. Im Gegensatz zu Metallen sind Energierohstoffe allerdings nicht recycelbar – wurden sie einmal verbraucht, können sie nicht wiederverwertet werden. Bei den im Folgenden dargestellten Handlungsoptionen liegt der Fokus auf Erdgas, da diesem Rohstoff als emissions-

ärmstem der fossilen Energieträger für den Klimaschutz und den Übergang²⁹⁵ zu einem nachhaltigen Energiesystem eine besondere Bedeutung zukommt.²⁹⁶

4.2.1 Erdgasspeicher

Zeitlich begrenzte Versorgungsengpässe und Preisschwankungen beim Erdgas können am einfachsten durch den Aufbau zusätzlicher Speicher abgefedert werden. Im Jahr 2014 betrug die Speicherkapazität für Erdgas in Deutschland circa 24 Milliarden Kubikmeter in 51 Unterspeichern (etwa jeweils zur Hälfte für saisonale und für tägliche Schwankungen).²⁹⁷ Dies entspricht rund einem Viertel der in Deutschland im Jahr 2013 verbrauchten Erdgasmenge. Nach Planungsstand 2014 könnte das Speichervolumen in Zukunft noch weiter ausgebaut werden, damit langfristig rund 32 Milliarden Kubikmeter zur Verfügung stünden.²⁹⁸

Eine vom Bundeswirtschaftsministerium beauftragte Untersuchungskommission kam im Jahr 2015 zu dem Schluss, dass die Versorgung mit Erdgas in Deutschland generell sicher ist. Träte allerdings ein politischer Konflikt mit den Lieferländern zeitgleich mit einer extremen oder dauerhaften Kälteperiode auf, könne es zu einer Versorgungslücke kommen.²⁹⁹ Um Engpässe auch in derartig kritischen Situationen zu vermeiden, wäre eine staatlich kontrollierte strategische Gasreserve³⁰⁰

²⁹⁴ So betragen die Ressourcen für Erdgas insgesamt 32.603 Exajoule und für Erdöl 18.594 Exajoule (davon jeweils etwa sechzig Prozent unkonventionell), für Kohle hingegen 490.716 Exajoule (BGR 2015-1).

²⁹⁵ Durch den Übergang von Kohle zu Erdgas ließen sich die CO₂-Emissionen auf etwa die Hälfte reduzieren. Vollständig vermeiden lassen sie sich allerdings nur durch den Einsatz erneuerbarer Energien oder durch die Abscheidung und dauerhafte Einlagerung des bei der Verbrennung fossiler Energieträger erzeugten CO₂ (CCS). Langfristig muss also auch der Erdgaseinsatz (sofern er ohne CCS erfolgt) reduziert werden, um die Klimaziele zu erreichen.

²⁹⁶ Eine Analyse möglicher Systeme der Stromversorgung 2050 mit einer CO₂-Reduktion von mindestens achtzig Prozent gegenüber 1990 zeigt, dass der Erdgaseinsatz für die Stromerzeugung in einigen Szenarien doppelt so hoch sein könnte wie heute (acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015).

²⁹⁷ LBEG Niedersachsen 2015.

²⁹⁸ BMWi 2014.

²⁹⁹ Becker Büttner Held-Partnerschaft 2015.

³⁰⁰ Die Gasspeicher in Deutschland werden privatwirtschaftlich betrieben.

denkbar. Als Vorbild könnte der Erdölbevorratungsverband³⁰¹ dienen, über den ein Erdölvorrat für 90 Tage sichergestellt wird. Gashändler und inländische Erdgasproduzenten würden verpflichtet, die entsprechenden Vorräte vorzuhalten. Die Reserve würde lediglich bei Feststellung der Notfallstufe durch die Bundesregierung zur Nutzung freigegeben.³⁰² Jedoch müsste die steigende Versorgungssicherheit gegen die Kosten der Einführung einer solchen Reserve abgewogen werden.

4.2.2 Lieferländer für Erdgas diversifizieren

Eine Möglichkeit, die Bezugsquellen zu diversifizieren, wäre der Ausbau der **Pipeline-Infrastruktur**, um zusätzliche Lieferanten im Mittleren Osten sowie Zentralasien zu erschließen. Alternativ kann **Flüssiggas** (Liquified Natural Gas, LNG) auf dem Weltmarkt bezogen werden. Weil es in Tankern transportiert wird, kann es auch aus Regionen ohne Pipeline-Anschluss importiert werden. Allerdings verbrauchen die Verflüssigung und Rückumwandlung viel Energie. Derzeit gibt es in Deutschland keine LNG-Terminals, in denen das Flüssiggas wieder in den Gaszustand gebracht werden kann. Die nächsten Terminals befinden sich in Belgien und in den Niederlanden, von dort müsste das Gas per Pipeline transportiert werden.³⁰³

4.2.3 Unkonventionelle Vorkommen nutzen

Auch die Gewinnung von Erdgas (sowie Erdöl) aus unkonventionellen Lagerstätten in Deutschland würde die Unabhängigkeit des Landes erhöhen. „Unkonventionell“ bezeichnet hierbei Vorkommen, die in sehr dichten Gesteinen lagern (zum Beispiel Schiefergas und Schieferöl) und häufig nur durch zusätzliche technische Maßnahmen gefördert werden können. Am bekanntesten ist die hydraulische Risserzeugung

durch das in der Öffentlichkeit kontrovers diskutierte **Hydraulic Fracturing** (Fracking). Fracking stößt bei vielen Bürgerinnen und Bürgern auf Ablehnung, da Umweltgefahren, insbesondere eine Verunreinigung des Grundwassers durch die verwendeten Chemikalien, befürchtet werden. Ein 2015 erschienenes Positionspapier von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass ein generelles Einsatzverbot der Technik auf Basis wissenschaftlicher und technischer Fakten nicht begründbar sei. Der Einsatz dieses Verfahrens müsse allerdings strengen Sicherheitsstandards folgen, klar geregelt sein und umfassend überwacht werden.³⁰⁴ Während die konventionellen Erdgasreserven voraussichtlich in etwa zehn Jahren aufgebraucht seien, könne die Erdgasförderung in Deutschland durch die Gewinnung von Schiefergas über Jahrzehnte auf dem derzeitigen Niveau fortgeführt werden.³⁰⁵

Selbst wenn politisch entschieden wird, Schiefergas nicht grundsätzlich in den Energiemix einzubeziehen, könnte es als „Notfallreserve“ bei drohenden Erdgas-Lieferengpässen genutzt werden. Dazu wären jedoch vorbereitende Maßnahmen erforderlich: Die Vorkommen müssten so weit exploriert und entwickelt werden, dass ein Förderbeginn innerhalb weniger Wochen möglich wäre. Darüber hinaus wären die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen.

Weitere Potenziale bietet **Erdgas aus Kohleflözen** vor allem im nördlichen Nordrhein-Westfalen – diese Lagerstätten müssen aber noch weiter erkundet werden. In anderen Ländern wie Australien und den USA werden solche Vorkommen bereits kommerziell genutzt. Nachteile sind der hohe Wasserverbrauch und die großen Abwassermengen, die dabei entstehen.³⁰⁶

301 Weitere Informationen unter <http://www.ebv-oil.org>.

302 Becker Büttner Held-Partnerschaft 2015, S. 157–173. Alternative Varianten, wie die Zuordnung der Reserve zum Fernleitungsnetzbetreiber und Speicherverpflichtungen für Marktakteure, werden in diesem Bericht ebenfalls diskutiert.

303 Becker Büttner Held-Partnerschaft 2015, S. 78.

304 acatech 2015.

305 acatech 2015; BGR 2016.

306 IASS 2014.

Auf lange Sicht könnte auch den **Methanhydraten**³⁰⁷ in der Tiefsee eine wachsende Bedeutung zukommen. Diese Vorkommen werden als sehr groß eingeschätzt, auch wenn die genauen Mengen und deren Förderkosten noch nicht beziffert werden können. Bisher ist die Förderung jedoch noch nicht wirtschaftlich. An Land hingegen, wo die Gashydrate in Dauerfrostgebieten mit Permafrostböden vorkommen, werden sie bereits abgebaut. Für Methanhydrate aus der Tiefsee ergibt sich eine ähnliche Situation wie für die marinen metallischen Rohstoffe (siehe Abschnitt Marine Rohstoffe): Die Exploration und der Abbau von Rohstoffen aus der Tiefsee sind technisch sehr anspruchsvoll und daher mit hohen Kosten verbunden. Wirtschaftlich lohnenswert wäre ihre Förderung daher nur, wenn der Marktpreis für Erdgas in Zukunft dauerhaft deutlich höher sein wird als heute. Neben der Technologieentwicklung und Klärung des wirtschaftlichen Nutzens besteht auch bei den möglichen Umweltbelastungen erheblicher Forschungsbedarf. Ob Gas aus Methanhydraten für die Energieversorgung bis 2050 überhaupt eine Rolle spielen wird, ist fraglich.

4.2.4 Alternative gasförmige Energieträger

Eine weitere Möglichkeit, die Abhängigkeit von Erdgasimporten zu reduzieren, ist die Herstellung gasförmiger Energieträger aus überschüssigem Wind- und Solarstrom (synthetisches Gas). Bei der sogenannten **Power-to-Gas-Technologie** wird mithilfe der Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Wasserstoff kann in Langzeitspeichern gelagert und in Zeiten geringer Stromeinspeisung aus Wind und Solaranlagen wieder zur Stromerzeugung genutzt werden. Alternativ kann er zur Wärmeerzeugung oder als Kraftstoff im Verkehr eingesetzt werden.

Geringe Wasserstoffmengen können einfach ins Erdgasnetz eingespeist werden. Derzeit ist eine Beimischung von fünf Prozent rechtlich erlaubt. Aus technischer Sicht wäre mit den heutigen Anlagen zur Nutzung von Gas in Industrie, Kleingewerbe und Haushalten unter Umständen eine Erhöhung auf zehn bis zwanzig Prozent möglich.³⁰⁸

Sollen größere Mengen synthetischen Gases zum Einsatz kommen, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder werden die Leitungen, Speicher und Verbrennungsanlagen technisch angepasst, sodass sie hohe Wasserstoffanteile oder sogar reinen Wasserstoff verarbeiten können, oder der Wasserstoff wird zu Methan weiterverarbeitet (zum Beispiel durch die Reaktion mit Kohlendioxid). Letzteres kostet zwar zusätzliche Energie und erhöht die Herstellungskosten, hat aber den Vorteil, dass die bestehende Infrastruktur für Erdgas ohne Einschränkungen genutzt werden kann.³⁰⁹ Um zu entscheiden, welche Variante am besten geeignet ist, sollten die Kosten des Infrastrukturaufbaus gegen die Kosten der Weiterverarbeitung zu Methan abgewogen werden.

Der große Vorteil von synthetischem Gas aus Wind- und Solarstrom ist, dass es keine CO₂-Emissionen verursacht. Daher ist es – im Gegensatz zu Erdgas – keine Übergangslösung auf dem Weg zu einer CO₂-neutralen Energieversorgung, sondern wird voraussichtlich auch langfristig ein wichtiger Bestandteil künftiger Energiesysteme sein.

Auch Biomethan, das heißt zu Erdgasqualität aufbereitetes Biogas, kommt als gasförmiger Energieträger infrage. Allerdings ist die Menge an nachhaltiger nutzbarer Biomasse begrenzt (siehe Abschnitt Biomasse als Energiequelle).

³⁰⁷ Bei Methanhydraten ist Methan in einem Käfig aus erstarrtem Wasser eingelagert. Sie bilden sich unter hohem Druck bei niedriger Temperatur.

³⁰⁸ DVGW 2013; Hüttenrauch/Müller-Syring 2010.

³⁰⁹ Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan.

5 Fazit

Zwar sind aus geologischer Sicht auch bei weltweit steigendem Bedarf ausreichend Metalle und Energierohstoffe vorhanden, um die Energiewende bis 2050 umzusetzen. Durch die hohe Abhängigkeit bei vielen wirtschaftsstrategischen Rohstoffen von wenigen Anbietern auf dem Weltmarkt ist eine dauerhafte Verfügbarkeit aller benötigten Rohstoffe am Markt zu bezahlbaren Preisen jedoch nicht garantiert. Hier können Politik und Industrie verschiedene Maßnahmen ergreifen, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Zudem ist für eine nachhaltige Energiewende auch entscheidend, dass die dafür eingesetzten Rohstoffe umwelt- und sozialverträglich gewonnen werden. In den folgenden Tabellen werden die vorgestellten Handlungsoptionen für eine nachhaltige, sichere und bezahlbare Rohstoffversorgung zusammengefasst.

Bei den angegebenen Zeithorizonten zur Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der Maßnahmen bezeichnet „kurzfristig“ einen Zeitraum von ein bis drei Jahren, „mittelfristig“ einen Zeitraum von drei bis zehn Jahren und „langfristig“ einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren.

5.1 Übersicht über Handlungsoptionen bei metallischen Rohstoffen

Um Erneuerbare-Energie-Anlagen, intelligente Netze und Speicher für das zukünftige Energiesystem zu errichten, wird eine Vielzahl von Metallen benötigt. Eine wichtige Rolle spielen die sogenannten Technologie- und Sondermetalle wie beispielsweise Kupfer, Kobalt und Lithium, die Platingruppenelemente, Indium, Tellur, Gallium und Germanium sowie die Seltenen Erden. Da bei einigen dieser Metalle die Recyclingraten noch gering sind und sie nicht in Deutschland abgebaut werden, müssen sie größtenteils importiert werden. Die im Folgenden vorgestellten Handlungsoptionen zielen darauf ab, die Importabhängigkeit zu verringern oder Lieferungen aus dem Ausland langfristig zu sichern.

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
3.1 Expertise und Wissenstransfer		
Entwicklung eines Lagerstättengesetzes, das Unternehmen zur Offenlegung bestimmter Daten verpflichtet	Effiziente Nutzung der geowissenschaftlichen Daten; Vermeidung von Doppelarbeit und Kosten	Eingriff in die Besitzrechte der Unternehmen Das Gesetz kann kurzfristig geändert werden, die Wirkung der Datenverfügbarkeit auf die Ressourcenverfügbarkeit entfaltet sich aber erst langfristig. Gut kombinierbar mit Maßnahmen, die Exploration und Bergbau in Deutschland fördern.
Europäisches Wissensnetzwerk für Rohstoffe (Beispiel EU Minerals Intelligence Network) unterstützen	Informationsgrundlage für Politik und Industrie schaffen	Konkurrenzdenken und uneinheitliche Datenstandards können die Umsetzung erschweren. Kurz- bis mittelfristig. Gut kombinierbar mit EuroGeoSurveys. Abstimmung auf EU-Ebene erforderlich.
Stärkere Unterstützung seitens der EU für EuroGeoSurveys, der Vereinigung der europäischen Geologischen Dienste und Fortschreibung der Raw Materials Initiative der EU	Informationsgrundlage für Politik und Industrie verbessern	Konkurrenzdenken und uneinheitliche Datenstandards können die Umsetzung erschweren. Kurz- bis mittelfristig. Gut kombinierbar mit Europäischem Wissensnetzwerk. Abstimmung auf EU-Ebene erforderlich.
Zusammenführung der geologischen, rohstoffrelevanten Datenbanken der Geologischen Landesämter	Erhöhung der Verfügbarkeit und effiziente Nutzung der Daten bei länderübergreifenden Lagerstättenproblemen	Föderales Denken kann die Umsetzung erschweren Kurzfristig möglich. Abstimmung auf Länderebene erforderlich.
Internationale Study Group für wirtschaftsstrategische Hightech-Metalle einrichten	Informationsgrundlage für Politik und Industrie schaffen	Mögliche fehlende Kooperationsbereitschaft zentraler Akteure, insbesondere der Industrie (Schutz von Betriebsgeheimnissen). Können kurzfristig eingerichtet werden, entfalten aber erst mittelfristig ihre Wirkung.
Stärkung der universitären Ausbildung und der universitären und außeruniversitären Forschung	Rohstoffexpertise in Deutschland aufbauen	Kooperation von Bund und Ländern erstrebenswert. Wirksamkeit erst sehr langfristig.
Rohstoffexpertise der Geologischen Dienste der Bundesländer stärken	Neue Rohstoffpotenziale in Deutschland erkunden	Personelle Unterbesetzung, Stärkung im Bereich internationale Rohstoffwirtschaft erforderlich. Wirksamkeit erst mittelfristig. Landespolitik für Finanzierung zuständig.
Fortschreibung des im Koalitionsvertrag zur 18. Legislaturperiode implementierten Rohstoffmonitorings	Kontinuierliche Beratung von Politik und Wirtschaft über Preis- und Lieferrisiken auf den Rohstoffmärkten	Ausbau des DERA-Rohstoffmonitorings, wird bereits umgesetzt und weitergeführt.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
3.2 Versorgungssicherheit		
Entwicklung effizienter technischer Recyclingstandards für besonders ressourcenrelevante Produktgruppen	Qualitativ hochwertiges Recycling, Rückgewinnung von Hightech-Metallen	Verpflichtende technische Standards, Registrierung aller Recycling- und Handelsunternehmen sowie zertifizierte Aufbereitungsanlagen notwendig. Mittelfristig umsetzbar. Sollte nach Möglichkeit langfristig EU-weit einheitlich sein. Wirksamkeit entfaltet sich am besten, wenn auf allen Prozessstufen das qualitativ hochwertige Recycling gefordert und gefördert wird (Sammeln, Demontage, Aufbereitung, Metallurgie).
Bei zuständigen Behörden die Fachkompetenz für das Recycling aufbauen, ähnlich wie bei den Bergbehörden	Überwachung der Einhaltung von Standards beim Recycling; Definition von Indices für die Recyclingfähigkeit von Produkten	Der zusätzliche bürokratische Aufwand könnte zu höheren Kosten führen. Mittelfristig möglich. Entwicklung der entsprechenden Standards ist die Voraussetzung.
Verbraucherfreundliche Sammelsysteme schaffen	Rückgaberrate von Elektronikprodukten erhöhen, um mehr Hightech-Metalle wiederverwerten zu können	Bei niedrigen Rohstoffpreisen nicht rentabel. Rechtliche Rahmenbedingungen, flächendeckendes Monitoring sowie Akzeptanz von Herstellern erforderlich. Regelungen können zwar kurz- bis mittelfristig eingeführt werden, flächendeckendes Monitoring und Umdenken bei Herstellern und Konsumenten aber eher mittelfristig. Wirksamkeit entfaltet sich am besten, wenn auf allen Prozessstufen das Qualitäts-Recycling gefordert und gefördert wird (Sammeln, Demontage, Aufbereitung, Metallurgie).
Leasing- und innovative Geschäftsmodelle für Elektronikprodukte entwickeln	Rückgaberrate von Elektronikprodukten erhöhen, um mehr Hightech-Metalle wiederverwerten zu können	Rechtliche Rahmenbedingungen sowie Akzeptanz von Herstellern und Verbrauchern sind erforderlich. Pilotprojekte können kurzfristig eingeführt werden, eine weite Verbreitung, die einen substanziellen Beitrag zur Ressourcenverfügbarkeit leistet, ist aber erst mittelfristig zu erwarten. Wirksamkeit entfaltet sich am besten, wenn auf allen Prozessstufen das Qualitäts-Recycling gefordert und gefördert wird (Sammeln, Demontage, Aufbereitung, Metallurgie).
Europaweite Hafenkontrollen stärken	Verhinderung illegaler Exporte von Elektronikschrott und Altfahrzeugen	EU-weite Kooperation und Anpassung des gesetzlichen Rahmens sind erforderlich. Kurz- bis mittelfristig möglich. Wirksamkeit am höchsten in Verbindung mit anderen Maßnahmen zur Verhinderung illegaler Elektroschrottexporte und mit der Einführung und Überwachung technischer Recyclingstandards.
System der Zolltarifnummern erweitern, um neue und gebrauchte Exportgüter unterscheiden zu können	Verhinderung illegaler Exporte von Elektronikschrott	EU-weite Kooperation und Anpassung des gesetzlichen Rahmens sind erforderlich. Kurz- bis mittelfristig möglich. Wirksamkeit am höchsten in Verbindung mit anderen Maßnahmen zur Verhinderung illegaler Elektroschrottexporte und mit der Einführung und Überwachung technischer Recyclingstandards.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
Elektronikschrott-Exporte nur an zertifizierte Reparatur- und Recyclingunternehmen zulassen	Verhinderung illegaler Exporte von Elektronikschrott	EU-weite Kooperation und Anpassung des gesetzlichen Rahmens sind erforderlich. Mittelfristig möglich. Wirksamkeit am höchsten in Verbindung mit anderen Maßnahmen zur Verhinderung illegaler Elektroschrottexporte. Einführung entsprechender technischer Recyclingstandards ist eine Voraussetzung.
Verfahren zur Aufbereitung und zur metallurgischen Rückgewinnung von komplexen Produkten und Hightech-Metallen verbessern	Umfassendere Rückgewinnung von Hightech-Metallen	Forschungsförderung findet bereits statt und kann problemlos fortgeführt werden. Wirkung entfaltet sich erst mittel- bis langfristig, nachdem Investoren gefunden worden sind.
Produktstandards/Labels für ein recyclingfähiges Produktdesign entwickeln	Umfassendere Rückgewinnung von Hightech-Metallen	Akzeptanz vonseiten der Industrie und der Verbrauchern ist fraglich. Rechtliche Rahmenbedingungen müssen für eine Vielzahl verschiedener Produkte und Rohstoffkomponenten geschaffen werden. Umdenken bei Herstellern und Konsumenten eher mittelfristig zu erwarten, zudem stehen je nach Lebenszeit der Produkte die Rohstoffe erst entsprechend später wieder zur Verfügung. Wirksamkeit entfaltet sich am besten, wenn auf allen Prozessstufen das Qualitäts-Recycling gefordert und gefördert wird (Sammeln, Demontage, Aufbereitung, Metallurgie). Leasing und andere serviceorientierte Geschäftsmodelle („Nutzen statt besitzen“) können einen entscheidenden Beitrag für reparatur- und recyclinggerechtere Produkte liefern.
Gründung eines staatlich geförderten deutschen Rohstoffunternehmens, das antizyklisch tätig wird und international agiert	Rohstoffbasis erweitern und Importabhängigkeit reduzieren, langfristige strategische Rohstoffsicherung für die deutsche Industrie. Beispielhafte Bergwerksbetriebe mit hohen Umwelt- und Sozialstandards	Der Staat müsste sich längerfristig finanziell beteiligen, unabhängig von aktuellen Rohstoffpreisen und Konjunkturlage; hohes finanzielles Risiko für den Steuerzahler; heterogene Interessenlagen zwischen Staat und Industrie. Staatliche Unternehmen arbeiten oft ineffizienter als privatwirtschaftliche; hohes Risiko, dass die Maßnahme volkswirtschaftlich ineffizient ist.
Betriebsfähigkeit von Bergwerken durch staatliche Hilfe aufrechterhalten (Care and Maintenance)	Heimische Rohstoffbasis erweitern beziehungsweise – bei Anwendung auf Bergwerke im Ausland – Verhinderung von Bildung von Oligo- und Monopolen	Dies stellt einen staatlichen Eingriff in den Markt dar, der zu Wettbewerbsverzerrungen führen kann. Wurde in Österreich erfolgreich praktiziert. Hohes Risiko, dass die Maßnahme volkswirtschaftlich ineffizient ist.
Auf Rohstoffvorkommen in Deutschland und Europa abgestimmte Forschung zur Exploration und Aufbereitung (für Nicht-Eisen-Metalle und ihre beibrechenden Elemente, sowie Edelmetalle)	Entdeckung von Lagerstätten und Nutzung von Rohstoffvorkommen in Deutschland und Europa	Relativ einfach umsetzbar. Beitrag zur Versorgungssicherheit erst langfristig zu erwarten. Gut kombinierbar mit: Ausbau der Expertise in Deutschland; Modernisierung des Lagerstättengesetzes. Bei Rohstoffabbau in Deutschland ist mit Widerstand von Umweltverbänden und Anwohnern (zum Beispiel Bürgerinitiativen) zu rechnen. Kommunikations- und Beteiligungsmöglichkeiten im Planungsverfahren können die Akzeptanz erhöhen.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
Gründung eines europäischen Fonds für kritische Rohstoffe	Langfristige strategische Rohstoffsicherung für die europäische Industrie	Heterogene Interessenlagen und ungeklärte Zuständigkeiten zwischen EU-Mitgliedstaaten, europäischer Politik und Industrie. Mittel- bis langfristig umsetzbar. Ein Konzept müsste auf europäischer Ebene zunächst entwickelt werden.
Forschung zu marinen Rohstoffen intensivieren	Informationsgrundlage und technisches Know-how für den späteren Abbau und die Verarbeitung schaffen, Umweltfolgen verstehen	Derzeit sind die Förderkosten der marinen Rohstoffe im Vergleich zu den augenblicklichen Marktpreisen der Rohstoffe noch zu hoch. Damit sie kommerziell gefördert werden können, sind erhebliche Fortschritte in der Förder- und Verarbeitungstechnologie erforderlich. Wirksamkeit sehr langfristig. Hohe und nicht genau vorhersehbare Kosten bei möglichem marinen Bergbau. Bei Rohstoffabbau in der Tiefsee ist mit Widerstand von Umweltverbänden zu rechnen.
Schaffung finanzieller Anreize für die Industrie zur Gewinnung mariner Rohstoffe	Rohstoffbasis erweitern und Importabhängigkeit reduzieren	Aufgrund augenblicklicher Rohstoffpreise und fehlender Technologien ist das Interesse seitens der Industrie derzeit nicht gegeben. Der Staat müsste sich längerfristig finanziell beteiligen, unabhängig von aktuellen Rohstoffpreisen und Konjunkturlage. Hohes finanzielles Risiko. Bei Rohstoffabbau in der Tiefsee ist mit Widerstand von Umweltverbänden zu rechnen.
Absicherung von Rohstoffprojekten im Ausland gegen politische und wirtschaftliche Ausfallrisiken	Erhöhung der Versorgungssicherheit Deutschlands mit kritischen Rohstoffen	Wird bereits erfolgreich angewendet. Kurzfristig einsetzbar.
Explorationsförderung	Realisierung von Maßnahmen zur Rohstoffgewinnung	Das Explorationsförderprogramm von 2013 wurde 2015 aufgrund mangelnder Interessen der Industrie eingestellt. Das erforderliche Interesse der rohstoffverbrauchenden Industrie ergibt sich eher in Hochpreisphasen, in denen es aber sehr teuer ist, Explorationsaktivitäten mit hohen Erfolgswahrscheinlichkeiten zu beginnen. Mittel- bis langfristig wirksam. Gut kombinierbar mit: Rohstoffexpertise stärken.
Anreize zur Lagerhaltung kritischer Hightech-Metalle in der Industrie schaffen	Lieferengpässe abfedern	Bereitschaft der Industrie ist abhängig von den Rohstoffpreisen und der Höhe der staatlichen Förderung, hohe Kosten. Hohes Risiko, dass die Maßnahme volkswirtschaftlich ineffizient ist.
Aufbau einer staatlichen Lagerhaltung kritischer Hightech-Metalle	Lieferengpässe abfedern	Hohe Kosten. Hohes Risiko, dass die Maßnahme volkswirtschaftlich ineffizient ist. Werden rohstoffverbrauchende Unternehmen über Versicherungsprämien oder Optionen auf Lieferung in Notfallsituationen beteiligt, so reduziert sich dieses Risiko, da Menge und Art der gelagerten Rohstoffe bedarfsgerecht bestimmt werden.

HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
3.3 Ressourceneffizienz		
Forschung und Entwicklung zur Weiterentwicklung von Exploration, Förderung und Aufbereitung	Effiziente, umweltfreundliche und kostengünstige Rohstoffgewinnung	Realisierbarkeit ist abhängig von einzelnen Technologien. Wirksamkeit erst langfristig, nachdem Investoren gefunden wurden.
Bilaterale technische Entwicklungszusammenarbeit stärken	Umwelt- und Sozialstandards etablieren, Effizienz im behördlichen Umgang mit Rohstoffvorhaben steigern	Eine langfristige Umsetzung der Standards und Maßnahmen und ihr praktischer Vollzug sind schwer zu garantieren.
Einführung einer Ressourcensteuer	Sparsamerer Rohstoffeinsatz	Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist fraglich. Um wettbewerbsneutral zu sein, müsste die Steuer international eingeführt werden, dies ist schwer umzusetzen.
3.4 Internationale Rohstoffpolitik		
Umsetzung einer globalen Ressourcen-Governance	Umwelt- und Sozialstandards weltweit angleichen, gerechteres Ressourcenmanagement	Heterogene Interessenslagen der Nationalstaaten, ungeklärte Zuständigkeit, Eingriff in die globalen Ressourcenmärkte. Es gibt bereits Ansätze wie Extractive Industry Transparency Initiative und andere rohstoffspezifische Ansätze, eine umfassende internationale Durchsetzung ist aber nur langfristig möglich.
Bilaterale Rohstoffabkommen schließen	Zugang zu Rohstoffen sichern, Umwelt- und Sozialstandards etablieren	Hängt von den Bedingungen im jeweiligen Land ab. Wirksamkeit hängt davon ab, ob die Industrie investiert.
Festlegung einer zentralen Ansprechperson für die deutsche Rohstoffpolitik, beispielsweise eines Staatssekretärs oder einer Staatssekretärin für Rohstoffe oder eines Beauftragten für Rohstoffe auf Staatssekretärebene	Koordination zwischen Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft; bessere Koordinierung der Rohstoffaktivitäten in Deutschland und der EU, höhere Sichtbarkeit der deutschen Rohstoffpolitik im Ausland	Relativ einfach kurzfristig umsetzbar. Auswirkungen auf die Rohstoffverfügbarkeit sind schwer einzuschätzen.
Transparenzmechanismen in Rohstofflieferketten etablieren und fördern	Umwelt- und Sozialstandards etablieren, Finanzierung von bewaffneten Konflikten durch Rohstoffe verhindern	Negative, nicht intendierte Auswirkungen auf die lokale Wirtschaft sind möglich, mangelnde Kontrollmöglichkeiten. Lückenlose Systeme zu etablieren ist schwierig. Mittelfristig umsetzbar.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Tabelle 2: Handlungsoptionen bei metallischen Rohstoffen

5.2 Übersicht über Handlungsoptionen bei Energierohstoffen

Als speicherbarer erneuerbarer Energieträger kann Bioenergie für die Strom- und Wärmeerzeugung sowie als Kraftstoff im Verkehr flexibel eingesetzt werden. Allerdings verursacht der Anbau von Biomasse Treibhausgasemissionen und weitere schädliche Umweltauswirkungen. Diese zu reduzieren ist das vorrangige Ziel der hier vorgestellten Handlungsoptionen.

Bei den fossilen Energieträgern liegt der Fokus der vorgestellten Handlungsop-

tionen auf dem Erdgas, dem als CO₂-ärmsten fossilen Energieträger eine besondere Bedeutung für die Energiewende zukommt.

Viele der diskutierten Handlungsoptionen für metallische Rohstoffe – Beobachtung der Märkte, Diversifizierung der Bezugsquellen, Reduzierung der Importabhängigkeit und Lagerhaltung sowie eine sparsamere Verwendung – können auch bei den fossilen Energierohstoffen Erdgas, Erdöl und Kohle eingesetzt werden und zu einer sicheren Versorgung beitragen. Die Optionen sind in der folgenden Tabelle nicht noch einmal aufgeführt.

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
4.1 Biomasse		
Beschränkung der steuerlichen Förderung auf solche Biokraftstoffe, die aus Abfällen oder Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern erzeugt wurden	Nahrungsmittelkonkurrenz und Umweltschäden durch den Anbau von Energiepflanzen vermeiden	Relativ einfach und kurzfristig umsetzbar Konformität mit EU-Recht ist sicherzustellen.
Einbeziehung der Landwirtschaft in den Emissionshandel	Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft reduzieren	Aufwendig, da die Erfassung der Emissionen aus der Landwirtschaft komplex ist und Widerstände der Landwirte zu erwarten sind. Gegebenenfalls könnten im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU erfasste Daten genutzt werden. Optimal wäre ein globales System, dessen Implementierung jedoch noch wesentlich aufwendiger wäre als ein nationales oder EU-weites System. Die Ausweitung des Emissionshandelssystems könnte schrittweise durchgeführt werden, so könnten mittelfristig große und einfach zu erfassende Emissionen in den europaweiten Emissionshandel einbezogen werden. Eine Einbeziehung der gesamten Landwirtschaft auf globaler Ebene wäre erst sehr langfristig möglich. Das Vorgehen muss auf EU-Ebene und darüber hinaus international abgestimmt werden. Ergänzung durch zusätzliche Maßnahmen (zum Beispiel Nachhaltigkeitsvorgaben) kann sinnvoll sein.
Schaffung von Nachhaltigkeitsvorgaben für den Energiepflanzenanbau und -import	Nahrungsmittelkonkurrenz und Umweltschäden durch den Anbau von Energiepflanzen vermeiden	Je mehr Länder und Agrarprodukte einbezogen werden, desto wirksamer, aber auch desto komplexer und schwieriger zu implementieren. Kann mittelfristig begonnen und schrittweise ausgeweitet werden. Die Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie) bietet Ansätze, auf denen man aufbauen könnte.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
Stickstoffdünger oder Stickstoffüberschüsse besteuern	Treibhausgasemissionen und andere Umweltfolgen der Stickstoffdüngung reduzieren	Relativ einfach und kurzfristig umsetzbar, wird in anderen EU-Ländern bereits umgesetzt.
Schaffung ordnungsrechtlicher Maßnahmen zum Erhalt kohlenstoffreicher Böden	Treibhausgasemissionen reduzieren, indem die Eigenschaft von Böden als Kohlenstoffspeicher erhalten wird	Relativ einfach und kurzfristig umsetzbar.
Brachflächen und degradiertes Land für den Anbau von Energiepflanzen nutzen	Zusätzliche Potenziale nachhaltiger Bioenergie erschließen, die nicht in Konkurrenz mit anderen Zielen wie zum Beispiel Sicherung der Nahrungsmittelproduktion stehen	Kommerzielle technische Verfahren, um Biogas und Biokraftstoffe aus diesen Pflanzen herzustellen, müssen noch entwickelt werden. Die Potenziale geeigneter Landflächen sind sehr umstritten. Mittel- bis langfristig umsetzbar. Nachhaltigkeitskriterien (unter anderem Definition für Brachflächen) und entsprechendes Monitoring sollten sicherstellen, dass keine Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderung verursacht werden und auf Brachflächen bestehende Ökosysteme nicht belastet werden.
Energetische Nutzung von Abfall ausweiten	Zusätzliche Potenziale nachhaltiger Bioenergie erschließen	Je nach Art des Abfalls gibt es technische und ökonomische Hürden. Technisch mittelfristig umsetzbar.
Lebensmittelverschwendung und Konsum tierischer Lebensmittel reduzieren	Landwirtschaftliche Flächen für Bioenergie freisetzen und Umweltfolgen der Landwirtschaft reduzieren	Änderungen des Verbraucherverhaltens sind erforderlich und in großem Maßstab wahrscheinlich erst langfristig zu erreichen.
Bioenergie gezielter einsetzen	Aus den begrenzten Bioenergiepotenzialen den größtmöglichen Nutzen für das Energiesystem herausholen	Eine bedarfsgerechte Verstromung von Biogas ist relativ leicht und kurz- bis mittelfristig umsetzbar. Die optimale Zuordnung zum Strom, Wärme- und Verkehrssektor ist jedoch aufwendiger. Der Zeithorizont der Umsetzung hängt von Investitionszyklen und vom Infrastrukturbedarf der jeweiligen Technologien ab. Sektorübergreifende marktbasierende, technologieoffene Instrumente wie der Emissionshandel könnten implizit zu einer ökonomisch sinnvollen Zuordnung des vorhandenen Bioenergiepotenzials führen. Einzelmaßnahmen im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor hingegen sollten explizit so aufeinander abgestimmt sein, dass sie im Zusammenspiel zu einer ökonomisch sinnvollen Zuordnung der Potenziale führen.

HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
Bioenergie mit Carbon Capture and Storage-Nutzen	Der Atmosphäre CO ₂ entziehen („negative Emissionen“)	Kann langfristig als Maßnahme im globalen Klimaschutz Bedeutung erlangen, da angesichts des andauernden Emissionsniveaus Optionen zur Entnahme von CO ₂ aus der Atmosphäre erwogen werden müssen. Einsatz in größerem Umfang vor 2050 unwahrscheinlich, allerdings müssten die erforderlichen Technologien und Infrastrukturen rechtzeitig entwickelt werden. Damit die Option in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zur Verfügung steht, müssten bereits mittelfristig Bioenergietechnologien im Hinblick auf ihre Kombinierbarkeit mit CCS, den potenziellen Beitrag zum Klimaschutz und die Auswirkungen auf Nahrungsmittelsicherheit und Umwelt geprüft werden. Sollte mit Maßnahmen kombiniert werden, die sicherstellen, dass die Bioenergie nachhaltig angebaut wird und die Nahrungsmittelsicherheit nicht gefährdet.
Großflächige Aufforstung durchführen	Der Atmosphäre CO ₂ entziehen („negative Emissionen“)	Kann mittel- bis langfristig als Maßnahme im globalen Klimaschutz Bedeutung erlangen. Es gelten im Prinzip die gleichen Überlegungen und Einschränkungen wie für Bioenergie mit CCS.
Einrichtung eines internationalen Ausschusses zum Monitoring von Phosphor	Laufende Kontrolle der Entwicklung von Reserven, Ressourcen und Geopotenzialen	Relativ einfach kurz- bis mittelfristig umsetzbar.
Entwicklung von technischen Verfahren zur Wiedergewinnung von Phosphor	Kreislaufwirtschaft für Phosphat aufbauen	Kostengünstige Technologien müssen entwickelt und großtechnisch umgesetzt werden. Wirksamkeit erst mittel- bis langfristig.
4.2 Fossile Energierohstoffe		
Erdgasspeicher ausbauen	Versorgungseingpässe bei Erdgas überbrücken	Hohe Kosten. Mittelfristig umsetzbar.
Pipeline- und LNG-Infrastruktur für Erdgas ausbauen	Zusätzliche Lieferländer erschließen	Hohe Kosten, mögliche Widerstände von Umweltverbänden und Anwohnern gegen Infrastrukturprojekte. Mittel- bis langfristig umsetzbar.
Schiefergas nutzen	Importabhängigkeit reduzieren	Ein Großteil der Bevölkerung lehnt die Fracking-Technologie ab, daher ist mit starken Widerständen zu rechnen. Technisch kurzfristig umsetzbar.
Erdgas aus Kohleflözen verstärkt nutzen	Importabhängigkeit reduzieren	Wird bereits genutzt. Erweiterte Nutzung würde Fracking-Technologie erfordern, daher ist mit Widerständen zu rechnen. Gesetzliche Rahmenbedingungen sind noch nicht vorhanden. Technisch kurzfristig umsetzbar.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Handlungsoption	Ziel	Umsetzbarkeit, Chancen und Risiken
Methanhydrate nutzen	Importabhängigkeit reduzieren	Derzeit sind die Förderkosten für Methanhydrate im Vergleich zum augenblicklichen Marktpreis für Erdgas noch zu hoch. Damit sie kommerziell gefördert werden können, sind erhebliche Fortschritte in der Fördertechnologie erforderlich. Die Technologie für marine Methanhydrate muss erst entwickelt werden. Ob dies vor 2050 realistisch ist, ist fraglich.
Gasförmige Energieträger aus Wind- und Solarstrom erzeugen (Power-to-Gas)	Klimaschutz, Ausgleich der volatilen Erzeugung aus Wind und Solarenergie	Kostengünstige Technologien müssen noch entwickelt werden. Mittel- bis langfristig in großem Maßstab umsetzbar.
HINWEIS kurzfristig: 3 – 6 Jahre, mittelfristig: 3 – 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre		

Tabelle 3: Handlungsoptionen bei Energierohstoffen

Glossar

Beibrechende Elemente

Die Vorkommen beibrechender Elemente sind an einen anderen Hauptwertstoff (Primärrohstoff) gebunden. Die mineralischen Erzphasen von Hauptwertstoff und Beiprodukt können dabei eng miteinander verwachsen sein oder das beibrechende Element ist fest im Kristallgitter des Primärrohstoffs eingebaut. In dem Fall können die Elemente oft nur unter sehr hohem Energieaufwand voneinander getrennt werden. Folglich ist die Gewinnung eines beibrechenden Elements zwangsläufig an die Gewinnung des Primärrohstoffs gekoppelt. Beibrechende Elemente werden daher von Rohstoffen unterschieden, die eigenständig in Lagerstätten vorkommen.

Care and Maintenance

Ein Bergwerk, das auf Care-and-Maintenance-Basis aufrechterhalten wird, befindet sich quasi im „Standby-Modus“. Care and Maintenance umfasst die fortlaufende Instandhaltung der Infrastruktur eines Bergwerks, zum Beispiel Pumpen, Wasserhaltung, Sicherungsarbeiten, aber auch Explorationsarbeiten, sodass das Bergwerk zu einem späteren Zeitpunkt jederzeit schnell betriebsbereit wäre.

Exploration

Der Begriff der Exploration umfasst die Suche nach und Erkundung von Rohstofflagerstätten an Land oder im Meer mittels verschiedenster wissenschaftlicher Methoden. Dazu gehören zum Beispiel geophysikalische Messverfahren am Erdboden oder die Analyse der geologischen Schichten des Erduntergrundes mithilfe von Flugsonden. Die dabei gesammelten Daten können genutzt werden, um damit dreidimensionale Modelle von Lagerstätten (Erzkörpern) zu erstellen, die durch Bohrungen überprüft werden. Für die Tiefsee werden zum

Teil andere Explorationstechnologien benötigt, beispielsweise seismische Messverfahren und Tauchroboter.

Kritische Elemente

Wenn es um die Verfügbarkeit von Rohstoffen geht, werden häufig die Begriffe „kritische“ und „wirtschaftsstrategische“ Rohstoffe verwendet. Die Bezeichnung „kritisch“ bezieht sich dabei nicht auf den jeweiligen Rohstoff an sich oder die Größe der Reserven oder Ressourcen, sondern darauf, inwieweit der Rohstoff verfügbar und wie wichtig er für die Wirtschaft ist. Hierbei spielen sowohl die Herkunftsländer und ihre politische Stabilität als auch Angebotskonzentrationen eine wichtige Rolle. Auch der Umwelteinfluss bei der Gewinnung von Rohstoffen wird oft in die Bewertung einbezogen.

Platingruppenelemente

Die Metalle der Platingruppenelemente umfassen Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium. Sie spielen für Brennstoffzellen und die Wasserstoffelektrolyse – und damit für einige mögliche Schlüsseltechnologien der Energiewende wie wasserstoffbasierte Elektromobilität (Brennstoffzellenfahrzeuge mit elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff), Langzeitspeicher und Power-to-Gas – eine wichtige Rolle. Platingruppenmetalle werden als kritische Elemente bewertet. Mehr als 68 Prozent des Platins kommt aus Südafrika, rund 75 Prozent des Palladiums stammt aus Russland und Südafrika.

Primäre Rohstoffgewinnung

Der Begriff bezieht sich auf die Gewinnung von Rohstoffen aus Erzen, im Bergbau oder in marinen Lagerstätten. Er unterscheidet sich von der sekundären Rohstoffgewinnung (Recycling).

Reserven, Ressourcen, Geopotenziale

Reserven sind unter aktuellen Bedingungen wirtschaftlich abbaubare Rohstoffvorkommen; sie können sich durch die Entdeckung zusätzlicher Vorkommen erhöhen oder beispielsweise durch Preisverfall verringern. Ressourcen sind bekannte Vorkommen, die jedoch nach aktuellem technischen Stand nicht wirtschaftlich abgebaut werden können. Geopotenziale sind Vorkommen, die entweder noch nicht oder nur zum Teil entdeckt sind. Somit sind über ihre wirtschaftliche Abbaubarkeit und ihren Umfang zum jeweils aktuellen Zeitpunkt keine plausiblen Aussagen machbar. Folglich stellen Geopotenziale die große Unbekannte dar. Alle drei Größen sind dynamisch und verändern sich ständig. Ihre Entwicklung hängt beispielsweise von aktuellen wirtschaftlichen Bedingungen (Preisen), dem technischen Fortschritt oder Umweltauflagen ab.

Sekundäre Rohstoffgewinnung

Die sekundäre Rohstoffgewinnung ist die Gewinnung von Rohstoffen durch Recycling aus Altmaterialien, wie zum Beispiel aus Produkten (Autos, Computern, weiteren Elektronikgeräten) und Infrastruktureinrichtungen (Straßen, Versorgungsleitungen).

Seltene Erden

Zu den Seltenen Erden, genauer Seltenerdmetallen, gehören insgesamt 17 Elemente des Periodensystems, unter anderem Yttrium, Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium, Europium, Cerium und Lanthan. Sie werden für zahlreiche Schlüsseltechnologien benötigt, unter anderem für Batterien, Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen, Motoren und Generatoren. Bei den Seltenen Erden ist die Länderkonzentration besonders hoch: Mehr als 86 Prozent der Weltbergwerksproduktion befinden sich in der Inneren Mongolei in China, der zweitgrößte Produzent ist Australien. Dagegen gibt es bekannte Vorkommen in vielen weiteren Ländern wie in Brasilien, den USA, Kanada oder Grönland, die sich aber nicht im Abbau befinden. Seltene Erden gehören zu den kritischen Elementen.

Sondermetalle

Sondermetalle sind keine scharf definierte Metallgruppe, im Allgemeinen versteht man darunter Selten-Erden-Elemente und Elektronikmetalle oder Halbleiterelemente wie Indium oder Germanium.

Technologiemetalle

Technologiemetalle werden auch als „High-tech-Metalle“ bezeichnet. Sie sind keine scharf definierte Metallgruppe, sondern im Allgemeinen Elemente wie Kupfer, Kobalt, Platingruppenelemente und die Sondermetalle.

Literatur

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Stabilität im Zeitalter erneuerbarer Energien* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

acatech 2015

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
(Hrsg.): *Hydraulic Fracturing: Eine Technologie in der Diskussion* (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag 2015.

adelphi 2015

adelphi (Hrsg.): Fallstudien zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung von Seltenen Erden in Mountain Pass, USA, 2015. URL: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_seltene_erden_mountainpass_adelphi.pdf [Stand: 10.05.2016].

AEE 2014-1

Agentur für Erneuerbare Energien: Akzeptanzumfrage 2014. URL: <http://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz2/akzeptanz-umfrage/akzeptanzumfrage-2014> [Stand: 11.01.2016].

AEE 2014-2

Agentur für Erneuerbare Energien: Holzenergie in Deutschland. Status Quo und Potenziale, 2014. URL: http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/317.Renews_Spezial_Holzenergie_Japan_DE_Mar14.pdf [Stand: 10.05.2016].

Angerer et al. 2016

Angerer, G./Buchholz, P./Gutzmer, J./Hagelüken, C./Hertz, P./Littke, R./Thauer, R./Wellmer, F.-W.: *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016.

Anzinger/Kostka 2015

Anzinger, N./Kostka, G.: *Studie: Großprojekte in Deutschland – Zwischen Ambition und Realität. Fact Sheet 1*. Hertie School of Governance, Mai 2015. URL: https://www.hertie-school.org/fileadmin/images/Downloads/pressmaterial/Grossprojekte_in_Deutschland_-_Factsheet_1.pdf [Stand: 07.10.2016].

Arvidsson 2005

Arvidsson, S.: Remote control and automation in Swedish iron ore mining, 2005. URL: http://www2.brgm.fr/fichiers/revue_01/remote.pdf [Stand: 10.05.2016].

Auswärtiges Amt 2015

Auswärtiges Amt: Nationaler Aktionsplan „Wirtschaft und Menschenrechte“, 2015. URL: http://www.auswaer-tiges-amt.de/DE/Aussenpolitik/Aussenwirtschaft/Wirtschaft-und-Menschenrechte/Aktuelles/161221_NAP_Kabinett_node.html [Stand: 02.01.2017].

Baka 2013

Baka, J.: „The Political Construction of Wasteland: Governmentality, Land Acquisition and Social Inequality in South India“. In: *Development and Change*, 44, 2013, S. 409–428.

Baka 2014

Baka, J.: „What wastelands? A critique of biofuel policy discourse in South India“. In: *Geoforum*, 54, 2014, S. 315–323.

Baka/Bailis 2014

Baka, J./Bailis, R.: „Wasteland energy-scapes: A comparative energy flow analysis of India's biofuel and biomass economies“. In: *Ecological Economics*, 108, 2014, S. 8–17.

BAM 2014

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: Workshop Abwasser – Phosphor – Dünger, 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/abstracts_workshop_abwasser-phosphor-duenger_28_29_jan_2014.pdf [Stand: 10.05.2016].

BDI 2015

Bundesverband der Deutschen Industrie: Handels- und Wettbewerbsverzerrungen bei Rohstoffen – Für einen diskriminierungsfreien Zugang und verlässliche Handelsregeln, 2015. URL: http://bdi.eu/media/presse/publikationen/energie-und-rohstoffe/20151001_Positionspapier_Handels-und-Wettbewerbsverzerrungen_bei_Rohstoffen.pdf [Stand: 09.02.2016].

Becker Büttner Held-Partnerschaft 2015

Becker Büttner Held-Partnerschaft: Schlussbericht: Möglichkeiten zur Verbesserung der Gasversorgungssicherheit und der Krisenvorsorge durch Regelungen der Speicher (strategische Reserve, Speicherverpflichtungen), einschließlich der Kosten sowie der wirtschaftlichen Auswirkungen auf dem Markt (Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), 2015. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/moeglichkeiten-zur-verbesserung-der-gasversorgungssicherheit-und-der-krisenvorsorge-durch-regelungen-der-speicher.properly=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 25.08.2015].

BGR 2013

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Phosphat. Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit, 2013. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Stand: 10.05.2016].

BGR 2014

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Manganknollen-Exploration im deutschen Lizenzgebiet, 2014. URL: <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/MarineRohstoffforschung/Meeresforschung/Projekte/Mineralische-Rohstoffe/Laufend/manganknollen-exploration.html?nn=1542296> [Stand: 31.01.2016].

BGR 2015-1

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Energiestudie 2015: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen (19)*, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015.

BGR 2015-2

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Deutschland – Rohstoffsituation 2014, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015.

BGR 2016

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Schieferöl und Schiefergas in Deutschland – Potenziale und Umweltaspekte. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2016.

Biogasrat 2012

Biogasrat (Hrsg.): *Biogas und Landwirtschaft, 2012.* URL: http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/Downloads/Studien/Studie_Biogasrat_e_V_Biogas_und_Landwirtschaft.pdf [Stand: 11.05.2016].

Biokraftstoffquotengesetz 2006

Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften (BioKraftQuG), 18.02.2006. URL: [http://www.bgb1.de/xaver/bgb1/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_o&tofc=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_o&bk=bgb1&start=%2F%2F\[%40node_id%3D%271122735%27\]&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1](http://www.bgb1.de/xaver/bgb1/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_o&tofc=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_o&bk=bgb1&start=%2F%2F[%40node_id%3D%271122735%27]&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1) [Stand: 12.05.2016].

Bleischwitz 2009

Bleischwitz, R.: „Ein internationales Abkommen als Kernelement eines globalen Ressourcenmanagements“. In: Bleischwitz, R./Pfeil, F. (Hrsg.): *Globale Rohstoffpolitik. Herausforderungen für Sicherheit, Entwicklung und Umwelt*, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft 2009, S. 147–162.

BMBF 2012

Bundesministerium für Bildung und Forschung:
 Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. Forschungs- und

Entwicklungsprogramm des BMBF für neue Rohstofftechnologien, September 2012. URL: http://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/ressourcenprofil/wirtschaftsstrategische_rohstoffe.pdf [Stand: 28.02.2016].

BMEL 2015

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft:
 Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe, Wirtschaftsjahr 2014/2015, 2015. URL: <http://berichte.bmelv-statistik.de/BFB-0111101-2015.pdf#page=24> [Stand: 11.05.2016].

BMUB 2012

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Deutsches Ressourceneffizienz-programm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Mai 2012. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_broschue-re_de_bf.pdf [Stand: 20.06.2016].

BMUB 2014

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Wasserwirtschaft in Deutschland. Teil 2: Gewässergüte, 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/wawi_teil_02_2014_web_korr_25.7.2014_2.pdf [Stand: 10.05.2016].

BMUB 2015

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, 2015. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_bf.pdf [Stand: 10.05.2016].

BMUB 2016

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Deutsches Ressourceneffizienz-programm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. März 2016. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_ii_broschue-re_bf.pdf [Stand: 20.06.2016].

BMWi 2010

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Rohstoffstrategie der Bundesregierung – Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. Berlin: BMWi 2010.

BMWi 2011

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Nationaler Masterplan Maritime Technologien (NMMT). Deutschland, Hochtechnologie-Standort für maritime Technologien zur nachhaltigen Nutzung der Meere. Berlin: BMWi 2011.

BMWi 2014

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Präventionsplan Gas für die Bundesrepublik Deutschland. Berlin: BMWi 2014.

BMWi 2015-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: 12. Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag über die Aktivitäten des Gemeinsamen Fonds für Rohstoffe und der einzelnen Rohstoffabkommen (Zeitraum 2012–2013), 2015. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/rohstoffbericht-jan-2015,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 16.02.2016].

BMWi 2015-2

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Wichtiger Schritt für mehr Rohstofftransparenz: Deutschland reicht EITI-Kandidatur ein, 2015. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Presse/pressemitteilungen,did=747728.html> [Stand: 09.02.2016].

BMWi 2016-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energiedaten: Gesamtausgabe, Stand Januar 2016. URL: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-grafiken,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 17.06.2016].

BMWi 2016-2

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Kohle, 2016. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Konventionelle-Energietraeger/kohle,did=190808.html> [Stand: 18.10.2016].

BMWi/BGR 2015

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Gemeinsame Pressemitteilung. Startschuss für weitere exklusive Erkundung von Rohstoffen in der Tiefsee, 2015. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Presse/pressemitteilungen,did=703968.html> [Stand: 31.01.2016].

Bright et al. 2012

Bright, R. M./Cherubini, F./Astrup, R./Bird, N./Cowie, A. L./Ducey, M. J./Marland, G./Pingoud, K./Savolainen, I./Strømman, A. H.: „A comment to ‚Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral‘: important insights beyond greenhouse gas accounting“. In: *Global Change Biology Bioenergy*, 4, 2012, S. 617–619.

Bundesregierung 2010

Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010. URL: https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [Stand: 10.05.2016].

Bundesregierung 2011

Bundesregierung: Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Mongolei über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich, 13.10.2013. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/A/abkommen-zwischen-brd-und-mongolei-zusammenarbeit-rohstoff-industrie-technologie,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Bundesregierung 2012

Bundesregierung: Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Republik Kasachstan über Partnerschaft im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich, 08.02.2012. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/A/abkommen-zwischen-brd-und-kasachstan-partnerschaft-rohstoff-industrie-und-technologiebereich,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Bundesregierung 2013

Bundesregierung: Gemeinsame Erklärung der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Republik Chile zur Zusammenarbeit im Bereich Bergbau und mineralische Rohstoffe, 26.01.2013. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/G/gemeinsame-erklaerung-chile-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Bundesregierung 2014-1

Bundesregierung: Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Republik Peru über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich, 14.07.2014. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/C-D/deutsch-peruanisches-abkommen,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Bundesregierung 2014-2

Bundesregierung: Drucksache 18/2978. Maßnahmen der Bundesregierung gegen Lebensmittelverschwendung, 2014. URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/029/1802978.pdf> [Stand: 10.05.2014].

Bundesregierung 2016

Bundesregierung: Verbraucherinnen und Verbraucher, 2016. URL: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/3-nachhaltige-entwicklung-alle-sind-Partner/Verbraucherinnen-Verbraucher/_node.html [Stand: 10.05.2016].

Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall 2012

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Bericht: „Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven“, 2012. URL: http://www.laga-online.de/servlet/is/23875/Bericht_Phosphor%C3%BCckgewinnung.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht_Phosphor%FCckgewinnung.pdf [Stand: 10.05.2016].

Bündnis 90/Die Grünen 2015

Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Ressourcenverschwendung stoppen – Nationales Ressourceneffizienzprogramm zukunftsfähig ausgestalten, Drucksache 18/7047, 2015. URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/070/1807047.pdf> [Stand: 15.02.2016].

Chatham House 2014

Chatham House: Livestock – Climate Change's Forgotten Sector. Global Public Opinion on Meat and Dairy Consumption, 2014. URL: ftp://ftp.unced.int/disk1/Library/Adlib_Catalogued_books/494_LivestockClimateChangeBaileyFroggattWellesleyFinal.pdf [Stand: 10.05.2016].

Cherubini et al. 2012

Cherubini, F./Bright, R. M./Strømman, A. H.: „Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: contributions from carbon fluxes and albedo dynamics“. In: *Environmental Research Letters*, 7, 45902, 2012.

Creutzig et al. 2015

Creutzig, F./Ravindranath, N. H./Berndes, G./Bolwig, S./Bright, R. M./Cherubini, F./Chum, H./Corbera, E./Delucchi, M./Faaij, A./Fargione, J./Haberl, H./Heath, G./Lucon, O./Plevin, R./Popp, A./Robledo Abad, C./Rose, S./Smith, P./Stromman, A./Suh, S./Masera, O.: „Bioenergy and climate change mitigation: an assessment“. In: *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 2015, S. 916–944.

DBFZ 2011

Deutsches BiomasseForschungszentrum (Hrsg.): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung, 2011. URL: https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/02_Basisinformationen_Reststoffe_web.pdf [Stand: 10.05.2016].

DERA 2014

Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: DERA-Rohstoffliste 2014. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken, 2014. URL: https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-24.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Stand: 11.05.2016].

DERA 2016-1

Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: DERA Rohstoffinformationen: Rohstoffe für die Zukunftstechnologien 2016. Studie erstellt durch Fraunhofer ISI. URL: http://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 21.07.2016].

DERA 2016-2

Deutsche Rohstoffagentur: *DERA-Rohstoffliste 2016: Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und*

Lieferrisiken, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA-Rohstoffinformationen, 32, 2016.

DGCN 2014

Deutsches Global Compact Netzwerk (Hrsg.): Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte. Umsetzung des Rahmens der Vereinten Nationen „Schutz, Achtung und Abhilfe“, 2014. URL: <http://www.auswaertiges-amt.de/cae/servlet/contentblob/690490/publicationFile/198916/UN-Leitprinzipien-DE.pdf> [Stand: 10.05.2016].

DGUV 2000-2012

DGUV 2000-2012: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Geschäftsergebnisse, 2000–2012.

DGUV 2014

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Meldepflichtige Arbeitsunfälle je 1 Mio. geleisteter Arbeitsstunden, 2014. URL: <http://www.dguv.de/de/Zahlen-und-Fakten/Arbeits-und-Wegeunfallgeschehen/Meldepflichtige-Arbeitsunfaelle-je-1-Mio.-geleisteter-Arbeitsstunden/index.jsp> [Stand: 10.05.2016].

DLA 2016

Defense Logistics Agency: Strategic Materials. Our Purpose. URL: <http://www.dla.mil/HQ/Acquisition/StrategicMaterials> [Stand: 10.05.2016].

Dodd-Frank Act 2010

Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act, H.R. 4173, 21.07.2010. URL: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-111publ203/pdf/PLAW-111publ203.pdf> [Stand: 13.02.2016].

Doetsch et al. 2010

Doetsch, P./Pinnekamp, J./Rath, W./Grömping, M.: Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm, 2010. URL: http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=folder&Itemid=67&lang=de [Stand: 10.05.2016].

Dranginis 2016

Dranginis, H.: Point of Origin. Status Report on the Impact of Dodd-Frank 1502 in Congo, The Enough Project, 2016. URL: http://www.enoughproject.org/files/DRC_PointofOrigin_022016.pdf [Stand: 22.04.2016].

Duhon et al. 2014

Duhon, M./McDonald, H./Kerr, S.: *Nitrogen Trading in Lake Taupo: An Analysis and Evaluation of Innovative Water Management Policy* (No. Motu Working Paper 14-XX), Wellington: Motu Economic and Public Policy Research 2014.

DVGW 2013

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.: *Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz*, Bonn 2013.

EC 2008

European Commission: The raw materials initiative – meeting our critical needs for growth and jobs in Europe (Communication from the Commission to the European Parliament and the Council), Brüssel 2008. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DCo699&from=EN> [Stand: 06.01.2016].

EC 2010

European Commission: Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 30.07.2010, URL: <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5662/attachments/1/translations/en/renditions/native> [Stand: 16.02.2016].

EC 2011

Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze, Brüssel, 02.02.2011, KOM(2011) 25 endgültig, URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0025:FIN:de:PDF> [Stand: 18.10.2016].

EC 2014-1

European Commission: Green Action Plan for SMEs. Enabling SMEs to turn environmental challenges into business opportunities, 2014. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0440&from=EN> [Stand: 26.02.2016].

EC 2014-2

Europäische Kommission: Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020–2030, Mitteilung an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, 12.02.2014. URL: eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:DE:PDF [Stand: 12.05.2016].

EC 2014-3

Europäische Kommission: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Unionssystems zur Selbstzertifizierung der Erfüllung der Sorgfaltspflicht in der Lieferkette durch verantwortungsvolle Einführer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten, COM(2014) 111 final, 2014/0059 (COD), 05.03.2014. URL: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5de359c4-a5f8-11e3-8438-01aa75ed71a1.0003.01/DOC_1&format=PDF [Stand: 23.04.2016].

EC 2014-4

Europäische Kommission: Anhänge des Vorschlags für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Unionssystems zur Selbstzertifizierung der Erfüllung der Sorgfaltspflicht in der Lieferkette durch verantwortungsvolle Einführer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten, COM(2014) 111 final,

Annexes 1 to 3, 05.03.2014. URL: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5de359c4-a5f8-11e3-8438-01aa75ed71a1.0003.01/DOC_2&format=PDF [Stand: 23.04.2016].

EC 2014-5

European Commission: Report on Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, Mai 2014, URL: http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm [Stand: 16.02.2016].

EC 2015

European Commission: The Monitoring and Evaluation Framework for the Common Agricultural Policy 2014–2020, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. URL: http://ec.europa.eu/agriculture/cap-2014-2020/monitoring-evaluation/leaflet-monitoring-evaluation-framework-cap-2014-2020_en.pdf [Stand: 15.06.2016].

EC 2016-1

European Commission: Policy and strategy for raw materials, 2016. URL: http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy/index_en.htm [Stand: 10.05.2016].

EC 2016-2

European Commission: Land use change, 2016. URL: <https://ec.europa.eu/energy/node/75> [Stand: 10.05.2016].

Ellen McArthur Foundation/McKinsey 2015

Ellen McArthur Foundation/McKinsey Center for Business and Environment: Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe, 2015. URL: https://www.mckinsey.de/sites/mck_files/files/growth_within_report_circular_economy_in_europe.pdf [Stand: 11.05.2016].

Elsner et al. 2015

Elsner, P./Fischedick, M./Sauer, D. U. (Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

EP 2015

Europäisches Parlament: Konfliktminerale: Parlament will obligatorische Zertifizierung von Importeuren, Pressemitteilung, 20.05.2015, URL: http://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/infopress/20150513IPR55318/20150513IPR55318_de.pdf [Stand: 17.10.2016].

ERECON 2015

European Rare Earths Competency Network: Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options, 2015. URL: ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10882/attachments/1/translations/en/renditions/native [Stand: 23.01.2016].

EU Fusions 2016

EU Fusions: Food and Feed Safety – Call for applications for European Platform on Food Losses and Food

Waste launched, 2016. URL: <http://www.eu-fusions.org/> [Stand: 10.05.2016].

Euler Hermes Aktiengesellschaft 2016

Euler Hermes Aktiengesellschaft: *Exportkreditgarantien der Bundesrepublik Deutschland – Hermesdeckungen. Jahresbericht 2015*, 2016.

Eurometaux 2015

European Association of Metals: Position Paper.

Eurometaux's proposed measures to ensure an effective EU circular economy, 2015. URL: http://www.eurometaux.org/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=8374&PortalId=0&TabId=57 [Stand: 26.01.2016].

EUROPOL 2015

European Police Office: Exploring tomorrow's organised crime, 2015. URL: <https://www.europol.europa.eu/content/massive-changes-criminal-landscape> [Stand: 26.01.2016].

Fargione et al. 2008

Fargione, J./Hill, J./Tilman, D./Polasky, S./Hawthorne, P.: „Land Changing and Biofuel Carbon Debt.“ In: *Science*, 319, 2008, S. 1235.

Flyvbjerg 2005

Flyvbjerg, B.: Policy and Planning for Large Infrastructure Projects: Problems, Causes, Cures. World Bank Policy Research Working Paper 3781, December 2005. URL: <http://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/1813-9450-3781> [Stand 07.10.2016].

Flyvbjerg 2014

Flyvbjerg, B.: „What You Should Know About Megaprojects and Why: An Overview“. In: *Project Management Journal*, 45: 2, 2014, S. 6–19.

Flyvbjerg/Sunstein 2015

Flyvbjerg, B./Sunstein, C.: „The Principle of the Malevolent Hiding Hand; or, the Planning Fallacy Writ Large“. In: *Social Research* (im Erscheinen). URL: <http://ssrn.com/abstract=2654423> [Stand: 07.10.2016].

Fuss et al. 2014

Fuss, S./Canadell, J. G./Peters, G. P./Tavoni, M./Andrew, R. M./Ciais, P./Jackson, R. B./Jones, C. D./Kraxner, F./Nakicenovic, N./Le Quéré, C./Raupach, M. R./Sharifi, A./Smith, P./Yamagata, Y.: „Betting on negative emissions“. In: *Nature Climate Change*, 4, 2014, S. 850–853.

Garantien für UFK 2014

Garantien für Ungebundene Finanzkredite: Jahresbericht 2014. URL: http://www.agaportal.de/pdf/dia_ufk/berichte/ufk_2014.pdf [Stand: 02.02.2016].

Gerhardt et al. 2015

Gerhardt, N./Sandau, F./Scholz, A./Hahn, H./Schumacher, P./Sager, C./Bergk, F./Kämper, C./Knörr, W./Kräcker, J./Lambrecht, U./Antoni, O./Hilpert, J./Merkel, K./Müller, T.: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in

Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung, 2015. URL: http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EEStrom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf [Stand: 11.05.2016].

Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen 2009

Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen 2009, 15.07.2009. URL: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%40attr_id%3D%27bgbl109s1804.pdf%27#__bgbl__%2F%2F%40attr_id%3D%27bgbl109s1804.pdf%27__1463070553615 [Stand: 12.05.2016].

Global Witness 2010

Global Witness: Return of the Blood Diamond. The Deadly Race to Control Zimbabwe's New-Found Diamond Wealth, 2010. URL: <https://www.globalwitness.org/en/reports/return-blood-diamond/> [Stand: 22.04.2016].

Global Witness 2013

Global Witness: The Kimberley Process, Briefing, 2013. URL: <https://www.globalwitness.org/en/campaigns/conflict-diamonds/kimberley-process/> [Stand: 12.02.2016].

Gocht 1983

Gocht, W. (Hrsg.): *Wirtschaftsgeologie und Rohstoffpolitik. Untersuchung, Erschließung, Bewertung, Verteilung und Nutzung mineralischer Rohstoffe*, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag 1983.

Gocht et al. 1988

Gocht, W./Zantop, H./Eggert, R. (Hrsg.): *International Mineral Economics. Mineral Exploration, Mine Valuation, Mineral Markets, International Mineral Policies*, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag 1988.

Grosjean et al. 2016

Grosjean, G./Fuss, S./Koch, N./Bodirsky, B. L./De Cara, S./Acworth, W.: Agriculture: Sleeping Beauty of EU Climate Policy? Overcoming Barriers to Implementation, 2016. URL: <http://ssrn.com/abstract=2734677> [Stand: 10.05.2016].

Gustavsson et al. 2011

Gustavsson, J./Cederberg, C./Sonesson, U./Otterdijk, R. van/Meybeck, A.: *Global Food Losses and Food Waste. Extent, Causes and Prevention*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 2011. URL: <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e.pdf> [Stand: 10.05.2016].

Haberl 2013

Haberl, H.: „Net land-atmosphere flows of biogenic carbon related to bioenergy: towards an understanding of systemic feedbacks“. In: *GCB Bioenergy*, 5, 2013, S. 351–357.

Haberl et al. 2013-1

Haberl, H./Schulze, E.-D./Körner, C./Law, B. E./Holtsmark, B./Luyssaert, S.: „Response: complexities of sustainable forest use“. In: *GCB Bioenergy*, 5, 2013, S. 1–2.

Haberl et al. 2013-2

Haberl, H./Erb, K.-H./Krausmann, F./Running, S./Se-archinger, T. D./Smith, W. K.: „Bioenergy: how much can we expect for 2050?“. In: *Environmental Research Letters*, 8, 31004, 2013.

Hagelüken 2014

Hagelüken, C.: „Recycling 2.0 – Verbesserung des Recyclings wirtschaftsstrategischer Metalle durch systemische Optimierung und industrielle Kooperation“. In: *DECHEMA Infotag „Wiedergewinnung strategischer Metalle“*, Vortrag, Frankfurt am Main, 13. Mai 2014.

Hagelüken 2015

Hagelüken, C.: „Recycling von (Edel)metallen aus Elektroaltgeräten“. In: *Wasser und Abfall*, 17:4, 2015, S. 14–19.

Hautzinger/Mayer 2004

Hautzinger, H./Mayer, K. (Hrsg.): Schlussbericht zum Forschungsprojekt 96.0756/2002/. Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens – insbesondere der Pkw-Fahrleistung – als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise, 2004. URL: http://www.ivt-verkehrsforschung.de/pdf/Kraftstoffpreise_und_Mobilitaet.pdf [Stand: 11.05.2015].

Havlík et al. 2011

Havlík, P./Schneider, U./Schmid, E./Böttcher, H./Fritz, S./Skalský, R./Kentaro Aoki, K./De Cara, S./Kindermann, G./Kraxner, F./Leduc, S./McCallum, I./Mosnier, A./Sauer, T./Obersteiner, M.: „Global land-use implications of first and second generation biofuel targets“. In: *Energy Policy*, 39: 10, 2011, S. 5690–5702.

Henning/Palzer 2015

Henning, H.-M./Palzer, A.: Energiesystem Deutschland 2050. Sektor- und energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien, 2012. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Holtsmark 2013

Holtsmark, B.: „The outcome is in the assumptions: analyzing the effects on atmospheric CO₂ levels of increased use of bioenergy from forest biomass“. In: *GCB Bioenergy*, 5, 2013, S. 467–473.

Humpenöder et al. 2014

Humpenöder, F./Popp, A./Dietrich, J. P./Klein, D./Lotze-Campen, H./Bonsch, M./Bodirsky, B. L./Weindl, I./Stevanovic, M./Müller, C.: „Investigating afforestation and bioenergy CCS as climate change mitigation strategies“. In: *Environmental Research Letters*, 9: 6, 2014.

Hüttenrauch/Müller-Syring 2010

Hüttenrauch, J./Müller-Syring, G.: „Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas“. In: *energie | wasser-praxis*, 10, 2010, S. 68–71.

IASS 2014

Institute for Advanced Sustainability Studies: Unkonventionelles Erdgas, 2014. URL: http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/rz_fact_sheet_150313_digital_de.pdf [Stand: 10.05.2016].

IEA 2014

International Energy Agency: *World Energy Outlook*, Paris: IEA, 2014.

IEA 2015

International Energy Agency: Key World Energy Statistics, 2015. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf [Stand: 10.06.2016].

IEA Bioenergy Task Force 31 2009

International Energy Agency Bioenergy Task Force 31: Biomass Production for Energy from Sustainable Forestry, 2009. URL: <http://www.ieabioenergy.com/task/biomass-production-for-energy-from-sustainable-forestry/> [Stand: 12.05.2016].

International Seabed Authority 2014

International Seabed Authority: Contractors for Seabed Exploration, 2014. URL: <https://www.isa.org.jm/sites/default/files/files/documents/isacontractors.pdf> [Stand: 28.03.2016].

International Seabed Authority 2015

International Seabed Authority: ISA and the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Sign Exploration Contract for Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts, 2015. URL: <https://www.isa.org.jm/news/isa-and-ministry-natural-resources-and-environment-russian-federation-sign-exploration-contract> [Stand: 24.02.2016].

iNudgeyou 2016

iNudgeyou: Projekter, 2016. URL: <http://inudgeyou.com/about/projects/> [Stand: 10.05.2016].

JOGMEC 2014

Japan Oil, Gas and Metal National Corporation: Annual Report 2014, URL: <http://www.jogmec.go.jp/content/300199977.pdf> [Stand: 02.02.2016].

JOGMEC 2015

Japan Oil, Gas and Metal National Corporation: JOGMEC's Activities. Metals, 2015. URL: <http://www.jogmec.go.jp/english/metal/index.html> [Stand: 10.05.2016].

Joyce et al. 2012

Joyce, A./Dixon, S./Comfort, J./Hallett, J.: „Reducing the Environmental Impact of Dietary Choice: Perspectives from a Behavioural and Social Change Approach“. In: *Journal of Environmental and Public Health*, 2012. URL: <http://www.hindawi.com/journals/jeph/2012/978672/> [Stand: 10.05.2016].

Kaltschmitt et al. 2009

Kaltschmitt, M./Hartmann, H./Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*, Berlin/Heidelberg: Springer 2009.

Kelly et al. 2009

Kelly, E./Schindler, D./Hodson, P./Short, J./Radmanovich, R./Nielsen, C.: „Oil sands development contributes elements toxic at low concentrations to the Athabasca River and its tributaries“. In: *PNAS*, 107:37, 2010, 16178–16183.

Kimberley Process 2016

Kimberley Process: About, 2016. URL: <http://www.kimberleyprocess.com/en/about> [Stand: 12.02.2016].

Klossek et al. 2016

Klossek, P./Kullik, J./van den Boogaart, K.: A systemic approach to the problems of the rare earth market. In: *Resource Policy*, 50, 2016, S. 131–140.

KORES 2013

Korea Resources Corporation: Overview. URL: <http://eng.kores.or.kr/views/cms/eng/bu/bu01.jsp> [Stand: 09.02.2016].

Kranert et al. 2012

Kranert, M./Hafner, G./Barabosz, J./Schuller, H./Levenenz, D./Kölbig, A./Schneider, F./Lebersorger, S./Scherhauser, S.: Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft 2012. URL: http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/Studie_Lebensmittel-abfaelle_Langfassung.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 10.05.2016].

Kraxner et al. 2013

Kraxner, et al.: Global bioenergy scenarios – Future forest development, land-use implications, and trade-offs, 2013.

Lambin/Meyfroidt 2011

Lambin, E./Meyfroidt, P.: „Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity“. In: *PNAS*, 108: 9, 2011, S. 3465–3472.

LBEG Niedersachsen 2015

Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: Jahresbericht Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland, 2015. URL: <http://www.lbeg.niedersachsen.de/erdoel-erdgas-jahresbericht/jahresbericht-erdoel-und-erdgas-in-der-bundesrepublik-deutschland-936.html> [Stand: 03.01.2017].

Leopoldina 2013

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: *Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), Halle (Saale) 2013. URL: http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2013_06_Stellungnahme_Bioenergie_DE.pdf [Stand: 10.05.2016].

Lieberwirth 2015

Lieberwirth, H.: Resource Technologies 2065, Fifth Freiberg Innovations Symposium, 26.03.2015.

Lundqvist et al. 2008

Lundqvist, J./de Fraiture, C./Molden, D.: Saving Water: From Field to Fork – Curbing Losses and Wastage in the Food Chain, 2008. URL: https://center.sustainability.duke.edu/sites/default/files/documents/from_field_to_fork_o.pdf [Stand: 11.05.2015].

McKinsey 2015-1

McKinsey: Europe's circular-economy opportunity, September 2015. URL: http://www.mckinsey.com/insights/sustainability/europes_circular-economy_opportunity [Stand: 26.01.2016].

McKinsey 2015-2

McKinsey: How digital innovation can improve mining productivity, November 2015. URL: <http://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-digital-innovation-can-improve-mining-productivity> [Stand: 27.03.2016].

Meyer 2012

Meyer, E.: Der Beitrag von Ressourcensteuern zu wirksamer Ressourcenschonung, 2012. URL: <http://www.foes.de/pdf/2012-08-Diskussionspapier-Ressourcensteuern.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Minerals4EU 2016

Minerals4EU: The Minerals4EU Project, 2016. URL: <http://www.minerals4eu.eu/index.php/about> [Stand: 10.05.2016].

Mining Journal 2016

Mining Journal: More Philippines nickel exports to be halted, 21.07.2016. URL: <http://www.mining-journal.com/world/asia/more-philippines-nickel-exports-to-be-halted/> [Stand: 17.10.2016].

Misereor 2013

Misereor: Menschenrechtliche Probleme im peruanischen Rohstoffsektor und die deutsche Mitverantwortung, 2013. URL: <https://www.misereor.de/fileadmin/publikationen/studie-rohstoffe-menschenrechte-in-peru.pdf> [Stand: 10.05.2016].

Moss et al. 2013

Moss, R. L./Tzimas, E./Willis, P./Arendorf, J./Tercero Espinoza, L.: *Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies*, JRC Scientific and Policy Reports, 2013. URL: http://www.oakdenehollins.co.uk/media/308/Critical_Metals_Decarbonisation.pdf [Stand: 10.05.2016].

MPI/BGR 2016

Max Planck Foundation for International Peace and Rule of Law/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Human Rights Risks in Mining. A Baseline Story, 2016. URL: <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/>

Downloads/human_rights_risks_in_mining.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Stand: 10.05.2016].

Newbold et al. 2015

Newbold, T./Hudson, L. N./Hill, S. L. L./Contu, S./Lysenko, I./Rebecca A. Senior, R. A./Börger, L./Bennett, D. J./Choimes, A./Collen, B./Day, J./De Palma, A./Díaz, S./Echeverria-Londoño, S./Edgar, M. J./Feldman, A./Garon, M./Harrison, M. L. K./Alhousseini, T./Ingram, D. J./Itescu, Y./Kattge, J./Kemp, V./Kirkpatrick, L./Kleyer, M.: „Global effects of land use on local terrestrial biodiversity“. In: *Nature*, 520, 2015, S. 45–50.

Nijssen et al. 2012

Nijssen M./Smeets, E./Stehfest, E./Vuuren, D. P.: „An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands“. In: *GCB Bioenergy*, 4, 2012, S. 130–147.

NRC 2007

National Research Council of the National Academies: Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Prepublication Version, 2007. URL: http://www.nma.org/pdf/101606_nrc_study.pdf [Stand: 10.05.2016].

OECD 2013

Organisation for Economic Co-operation and Development: Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas: Second Edition, 2013. URL: <http://www.oecd.org/daf/inv/mne/GuidanceEdition2.pdf> [Stand: 09.02.2016].

OECD 2016

Organisation for Economic Co-operation and Development: The Ocean Economy in 2030. Paris: OECD Publishing, 2016.

Opalka 2014

Opalka, B.: E-Waste to Exceed 93.5 Million Tons Annually, environmental leader, 2014. URL: <http://www.environmentalleader.com/2014/02/24/e-waste-to-exceed-93-5-million-tons-annually/> [Stand: 26.01.2016].

Osterburg et al. 2009

Osterburg, B./Nieberg, H./Rüter, S./Isermeyer, F./Hanel, H.-D./Hahne, J./Krentler, J.-G./Paulsen, H.-M./Schuchardt, F./Schweinle, J./Weiland, P.: Erfassung, Bewertung und Minderung von Treibhausgasemissionen des deutschen Agrar- und Ernährungssektors. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2009. URL: <https://www.econstor.eu/dspace/bitstream/10419/39359/1/608950440.pdf> [Stand: 11.05.2016].

Pinnekamp et al. 2011

Pinnekamp, J./Weinfurter, K./Sartorius, C./Gäth, S.: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland, 2011. URL: http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=folder&Itemid=67&lang=de [Stand: 10.05.2016].

Plevin et al. 2010

Plevin, R./O'Hare, M./Jones, A./Torn, M./Gibbs, H.: Greenhouse Gas Emissions from Biofuels' Indirect Land Use Change Are Uncertain but May Be Much Greater than Previously Estimated. In: *Environmental Science and Technology*, 44: 21, S 8015–8021, 2010.

Rohstoffabkommen Mongolei 2011

Rohstoffabkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Mongolei über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich, 2011. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/A/abkommen-zwischen-brd-und-mongolei-zusammenarbeit-rohstoff-industrie-technologie.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 01.02.2016].

Reisch et al. 2013

Reisch, L./Eberle, U./Lorek, S.: „Sustainable Food Consumption: an Overview of Contemporary Issues and Policies“. In: *Sustainability: Science, Practice & Policy*, 9: 2, 2013 S. 7–25.

Reisch/Sunstein 2016

Reisch, L./Sunstein, C. R.: Do Europeans Like Nudges?, 2016. URL: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2739118 [Stand: 10.05.2016].

Renn 2015

Renn, O. (Hrsg.): *Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

Renn 2017

Renn, O. (Hrsg.): *Risiko und Resilienz im Energiesystem* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017 i. E.

Richtlinie 2009/28/EG

Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) Nr. L 140/16, 05.06.2009.

Rockström et al. 2009

Rockström, J./Steffen, W. L./Noone, K./Persson, Å./Chapin III, F. S./Lambin, EF./Lenton, T. M. Scheffer, M.: „Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity“. In: *Ecology and Society*, 14: 2, 2009.

Sächsisches Oberbergamt 2014

Sächsisches Oberbergamt (Hrsg.): *Der Bergbau in Sachsen Bericht des Sächsischen Oberbergamtes und des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Referat Rohstoffgeologie) für das Jahr 2013*. 2014.

Schäuble et al. 2014

Schäuble, D./Volkert, D./Jacobs, D./Töpfer, K.: *CO₂-Emissionsgrenzwerte für Kraftwerke – Gestaltungsansätze und Bewertung einer möglichen Einführung auf nationaler Ebene* (IASS Working Paper), 2014.

URL: http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working_paper_emissionsgrenzwerte.pdf [Stand: 10.05.2016].

Scholz et al. 2014

Scholz, R./Wellmer, F.-W./DeYoung jr., J. H.: „Phosphorus Losses in Production Processes before the ‚Crude Ore‘ and ‚Marketable Production‘ Entries in Reported Statistics“. In: Scholz, R./Roy, A. H./Brand, F. S./Hellums, D. T./Ulrich, A. E. (Hrsg.): *Sustainable Phosphorus Management – A Global Transdisciplinary Roadmap*, Dordrecht/Heidelberg: Springer Verlag 2014.

Schulze et al. 2012

Schulze, E./Körner, C./Law, B. E./Haberl, H./Luyssaert, S.: Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. In: *GCB Bioenergy*, 4, 2012, S. 611–616.

Searchinger et al. 2008

Searchinger, T./Heimlich, R./Houghton, R. A./Dong, F./Elobeid, A./Fabiosa, J./Tokgoz, S./Hayes, D./Yu, T.-H.: „Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change“. In: *Science*, 319, 2008, S. 1238–1240.

Shapiro/Lorenz 2000

Shapiro, A./Lorenz, C.: „Large-scale projects as complex systems: Managing ‚scope creep‘“. In: *The System Thinker*, 11: 1, 2000.

Smith et al. 2014

Smith P./Bustamante, M./Ahammad, H./Clark, H./Dong, H./Elsiddig, E. A./Haberl, H./Harper, R./House, J./Jafari, M./Masera, O./Mbow, C./Ravindranath, N. H./Rice, C. W./Robledo Abad, C./Romanovskaya, A./Sperling, F./Tubiello, F.: „Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)“. In: Edenhofer, O./Pichs-Madruga, R./Sokona, Y./Farahani, E./Kadner, S./Seyboth, K./Adler, A./Baum, I./Brunner, S./Eickemeier, P./Kriemann, B./Savolainen, J./Schlömer, S./Stechow, C. von/Zwicker, T./Minx, J. C. (Hrsg.): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom/New York, USA: Cambridge University Press 2014. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf [Stand: 11.05.2016].

Smith et al. 2015

Smith P./Davis, S. J./Creutzig, F./Fuss, S./Minx, J./Gabrielle, B./Kato, E./Jackson, R. B./Cowie, A./Kriegler, E./van Vuuren, D. P./Rogelj, J./Ciais, P./Milne, J./Canadell, J. G./David McCollum, D./Peters, G./Andrew, R./Krey, V./Shrestha, G./Friedlingstein, P./Gasser, T./Grübler, A./Heidug, W. K./Jonas, M.: „Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions“. In: *Nature Climate Change*, 6, 2016, S. 42–50.

SRU 2015

Sachverständigenrat für Umweltfragen: Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem, 2015. URL: <http://www.umweltrat.de/>

SharedDocs/Downloads/DE/o2_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 10.05.2015].

Sterner/Fritsche 2011

Sterner, M./Fritsche, U.: „Greenhouse gas balances and mitigation costs of 70 modern Germany-focused and 4 traditional biomass pathways including land-use change effects“. In: *Biomass and Bioenergy*, 35: 12, 2011, S. 4797–4814.

Stichnothe/Schuchardt 2010

Stichnothe, H./Schuchardt, F.: „Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis“. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 2010, S. 907–915.

The Minerals Law of Mongolia 2006

The Minerals Law of Mongolia, Fassung vom 30.10.2006, URL: http://www.charltonsmine.com/images/stories/Overseas_Law/Mongolia/minerallawsofmongolia.pdf [Stand: 01.02.2016].

TU Clausthal/BGR 2013

Technische Universität Clausthal/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: ENTIRE – Entwicklung der internationalen Diskussion zur Steigerung der Ressourceneffizienz, 2013, URL: https://www.ifa.tu-clausthal.de/fileadmin/Aufbereitung/Bilder/Forschung/abgeschlossene_Projekte/Studien/ENTIRE-Bericht.pdf [Stand: 02.02.2016].

Turkenburg 2012

Turkenburg, W.: „Renewable Energy“. In: *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*, Cambridge, UK/New York USA: Cambridge University Press/Laxenburg, AU: International Institute for Applied Systems Analysis 2012, S.761–900. URL: http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter11_renewables_lowres.pdf [Stand: 17.10.2016].

UBA 2010

Umweltbundesamt: 2050: 100%. Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen, 2010. URL: http://www.energymap.info/download/UBA-Energieziel_2050.pdf [Stand: 10.05.2016].

UBA 2011

Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt. Umwelt und Landwirtschaft, 2011. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4056.pdf> [Stand: 10.05.2016].

UBA 2013

Umweltbundesamt: Klimaschutz und Emissionshandel in der Landwirtschaft, 2013. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4397.pdf> [Stand: 10.05.2016].

UBA 2014-1

Umweltbundesamt: Einträge von Nähr- und Schadstoffen in die Oberflächengewässer, 2014. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/gewaesserbelastung/>

fliessgewaesser/eintraege-von-naehr-schadstoffen-in-die [Stand: 10.05.2016].

UBA 2014-2

Umweltbundesamt (Hrsg.): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2013. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013, 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_29_2014_schrempf_komplett_10.11.2014_o.pdf [Stand: 12.05.2016].

UBA 2016

Umweltbundesamt: Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“, 2016. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf [Stand: 09.03.2016].

Umweltbundesamt Österreich 2011

Umweltbundesamt Österreich: Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle, 2011. URL: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REPO353.pdf> [Stand: 11.05.2016].

UNCLOS 1982

United Nations Convention on the Law of the Sea, 1982. URL: http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf [Stand: 28.03.2016].

UNEP 2015

United Nations Environment Programme: Waste Crime – Waste Risks. Gaps in meeting the global waste challenge, 2015. URL: <http://www.grida.no/publications/rr/waste-crime/> [Stand: 10.05.2016].

Universität Freiburg 2016

Universität Freiburg: SPP 1685 – Ecosystem nutrition: forest strategies for limited phosphorus resources, 2016. URL: <https://www.bodenkunde.uni-freiburg.de/forschung/SPP1685> [Stand: 10.05.2016].

USGS 2015

U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey: Mineral Commodities Summary, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.3133/70140094> [Stand: 10.05.2016].

Vermont/De Cara 2010

Vermont, B./De Cara, S.: „How costly is mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions from agriculture?“. In: *Ecological Economics*, 69: 7, 2010, S. 1373–1386.

WBGU 2009

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: *Future Bioenergy and Sustainable Land Use*, London: Earthscan 2009.

Weiser et al. 2014

Weiser, C./Zeller, V./Reinicke, F./Wagner, B./Majer, S./Vetter, A./Thrän, D.: „Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different

straw-based energy applications in Germany“. In: *Applied Energy*, 114, 2014, 749–762.

Weizsäcker 2016

Weizsäcker, E. U. von, zitiert in Wille, J.: „Starker Preisverfall bei Rohstoffen“. In: *Frankfurter Rundschau*, 14.01.2016, URL: <http://www.fr-online.de/wirtschaft/ressourcen-starker-preisverfall-bei-rohstoffen,1472780,33524602.html> [Stand: 15.02.2016].

Wellmer 1986

Wellmer, F.-W.: „Risk elements characteristic of mining investments“. In: *Publications of the 13th Council of Mining and Metallurgical Institutions Congress*, Singapur, 11. bis 16. Mai 1986, Volume 5, S. 17–24.

Wellmer/Hagelüken 2015

Wellmer, F.-W./Hagelüken, C.: „The Feedback Control Cycle of Mineral Supply, Increase of Raw Material Efficiency, and Sustainable Development“. In: *Minerals*, 5, 2015, S. 815–836.

Wellmer/Scholz 2015

Wellmer, F.-W./Scholz, R. W.: „The Right to Know the Geopotential of Minerals for Ensuring Food Supply Security: The Case of Phosphorus“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 19: 1, 2015, S. 3–6.

Wiedicke et al. 2012

Wiedicke, M./Kuhn, T./Rühlemann, C./Schwarz-Schampera, U./Vink, A.: Marine Mineralische Rohstoffe der Tiefsee – Chance und Herausforderung, 2012. URL: http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/40_marine-mineralische-rohstoffe-tiefsee.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 24.02.2016].

Wipperfurth 2015

Wipperfurth, H.: „US-Gesetz zu Konfliktmineralien steht infrage“. In: *Deutschlandfunk Online*, 30.09.2015. URL: http://www.deutschlandfunk.de/demokratische-republik-kongo-us-gesetz-zu-697.de.html?dram:article_id=332554 [Stand: 23.04.2016].

Wolfe 2015

Wolfe, L.: „How Dodd-Frank Is Failing Congo“. In: *Foreign Policy*, 2015. URL: <http://foreignpolicy.com/2015/02/02/how-dodd-frank-is-failing-congo-mining-conflict-minerals/> [Stand: 13.02.2016].

World Bank 2011

World Bank Raw Materials Group: *Overview of State Ownership in the Global Minerals Industry – Long Term Trends and Future*. Mai 2011. URL: <http://siteresources.worldbank.org/INTOGMC/Resources/GlobalMiningIndustry-Overview.pdf> [Stand 07.10.2016].

World Ocean Review 2014

World Ocean Review: Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken (3), 2014. URL: http://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3_gesamt.pdf [Stand: 10.05.2016].

WTO 2014

World Trade Organization: China – Measures Related to the Exportation of Rare Earths, Tungsten, and Molybdenum, Reports of the Panel: WT/DS431/R, WT/DS432/R, WT/DS433/R, 2014, URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/431_432_433r_e.pdf [Stand: 24.03.2016].

WWF 2012

WWF Deutschland: Klimawandel auf dem Teller, 2012. URL: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klimawandel_auf_dem_Teller.pdf [Stand: 10.05.2016].

Yang et al. 2013

Yang, X. J./Lin, A./Li, X.-L./Wu, Y./Zhou, W./Chen, Z.: „China’s ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation“. In: *Environmental Development*, 8, 2013, S. 131–136.

Über das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 100 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren und Energieversorgung.

Mitwirkende des Projekts

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Die vorliegende Stellungnahme entstand unter Federführung der Arbeitsgruppe „Ressourcen“. Auf Basis der im August 2016 veröffentlichten Analyse „Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse“ haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler politische Handlungsoptionen für eine sichere und nachhaltige Rohstoffversorgung entwickelt.

Dr. Gerhard Angerer	Consultant
Dr. Peter Buchholz	Deutsche Rohstoffagentur, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Prof. Dr. Jens Gutzmer	TU Bergakademie Freiberg
Dr.-Ing. Christian Hagelüken	Umicore
Prof. Dr. Peter Herzig	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Ralf Littke	RWTH Aachen
Prof. Dr. Rudolf K. Thauer	Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie
Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Wellmer	Ehemaliger Präsident Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Weitere Mitwirkende

Dr. Sabine Fuss	Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change
Prof. Dr. Justus Haucap	Duesseldorf Institute for Competition Economics
Prof. Dr. Peter N. Posch	Technische Universität Dortmund

Wir danken Prof. Dr. Marian Paschke (Universität Hamburg) für seine Anregungen zur internationalen Rohstoffpolitik, sowie Dr. Maximilian Spohr (Max-Planck-Stiftung für Internationalen Frieden und Rechtsstaatlichkeit) für seine Hinweise zu den Menschenrechten im Bergbau.

Wissenschaftliche Referenten

Dr. Berit Erlach	acatech
Jakob Kullik	Technische Universität Chemnitz

Gutachter

Wir danken allen externen Fachgutachtern. Die Inhalte der vorliegenden Stellungnahme liegen in der alleinigen Verantwortung der Akademien.

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	Technische Universität Clausthal-Zellerfeld
Prof. Mag. Dr. Helmut Haberl	Alpen-Adria-Universität Klagenfurt
Dr. Duncan Large	Consulting Geologist
Prof. Dr. Franz Michael Meyer	RWTH Aachen
Prof. em. Dr. Roland Oberhänsli	Universität Potsdam
Prof. Dr. Armin Reller	Universität Augsburg

Institutionen und Gremien

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Direktorium

Das Direktorium leitet die Projektarbeit und vertritt das Projekt nach außen.

Prof. Dr. Robert Schlögl (Vorsitzender)	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Gesellschaft für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Carl Friedrich Gethmann	Universität Siegen
Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer	RWTH Aachen
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Eberhard Umbach	acatech Präsidium

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Präsident
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Altpräsidialmitglied Leopoldina
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium
Prof. Dr. Martin Grötschel	Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“

Prof. Dr. Klaus Töpfer	Ehemaliger Exekutivdirektor UNEP
Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Bildung und Forschung
Rainer Baake (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach Leiter der Geschäftsstelle, acatech

Rahmendaten**Projektlaufzeit**

03/2016 bis 02/2019

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2016) gefördert.

Die Stellungnahme wurde am 20. Oktober 2016 vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina e. V.
Nationale Akademie der Wissenschaften

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e. V.

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: 0345 47239-600
Fax: 0345 47239-919
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: 089 520309-0
Fax: 089 520309-9
E-Mail: info@acatech.de

Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: 06131 218528-10
Fax: 06131 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

ISBN: 978-3-8047-3664-1