



KRITISCHE ROHSTOFFE BEIM WINDENERGIEAUSBAU

Dr. Peter Viebahn, Dipl.-Umweltwiss. Ole Soukup

Einleitung

Der Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) wird zunehmend nicht nur im Hinblick auf Kostenaspekte, Versorgungssicherheit, Auswirkungen auf Landnutzung und Landschaftsbild oder Akzeptanzfragen, sondern auch hinsichtlich seines Ressourcenverbrauchs diskutiert. Dabei ist unstrittig, dass die Gesamt-Ressourceninanspruchnahme eines Energiesystems generell erheblich niedriger ist, je mehr es auf EE basiert (und dabei nicht hauptsächlich auf Biomasse ausgerichtet ist). Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass die EE hinsichtlich des Ressourceneinsatzes in jedem Fall als unproblematisch zu betrachten sind. Insbesondere der Verbrauch und die langfristige Verfügbarkeit der mineralischen Rohstoffe, die in der Regel zur Herstellung von Energiewandlern und Infrastruktur benötigt werden, wurden bisher wenig untersucht. Eine aktuelle Studie (Wuppertal Institut 2014) trägt dazu bei, die bisherige Bewertungslücke zu schließen und Hinweise darauf zu geben, ob und wie sich eine Energiewende mit hohem Ausbau der EE ressourceneffizienter gestalten lässt.

Systemanalytischer Ansatz

Im Rahmen der Studie wurde untersucht, welche „kritischen“ mineralischen Rohstoffe für die Herstellung von Technologien, die Strom, Wärme und Kraftstoffe aus EE erzeugen, bei einer zeitlichen Perspektive bis zum Jahr 2050 in Deutschland relevant sind. Die Einschätzung als „kritisch“ umfasst dabei die langfristige Verfügbarkeit der identifizierten Rohstoffe, die Versorgungssituation, die Recyclingfähigkeit und die Umweltbedingungen der Förderung. Einbezogen in die Analyse wurden zunächst alle Technologien, die in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten zum Einsatz kommen könnten, ergänzt um Infrastrukturanlagen wie Energiespeicher und Stromnetze. Sekundäranwendungen wie z. B. Batterien in Elektrofahrzeugen, die EE nicht direkt nutzen, wurden nicht betrachtet.

Die Analyse erfolgte unter Berücksichtigung verschiedener Langfrist-Energieszenarien, die für das deutsche Energiesystem erstellt wurden. Sie beschreiben unterschiedliche Pfade des Ausbaus der EE bis zum Jahr 2050, in Abbildung 1 für den Stromsektor dargestellt. Auf Grundlage dieser

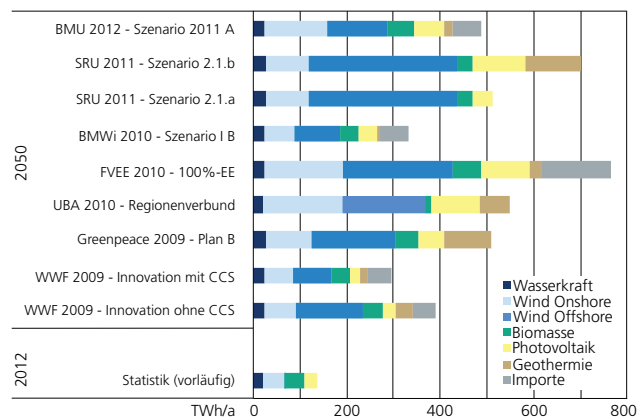


Abbildung 1: Stromanzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2050 nach verschiedenen Szenarien

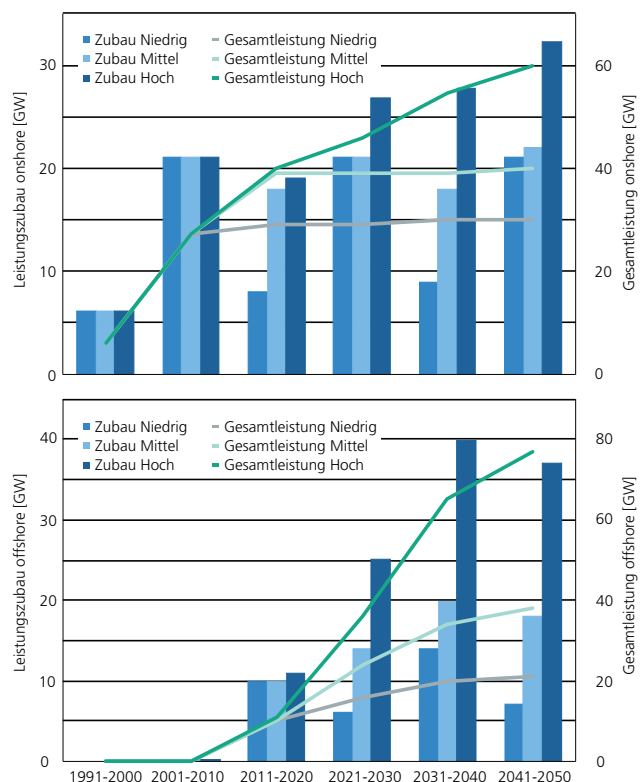


Abbildung 2: Gesamtleistung am Ende eines Jahrzehnts und Leistungszubau pro Jahrzehnt in den verschiedenen Ausbaupfaden

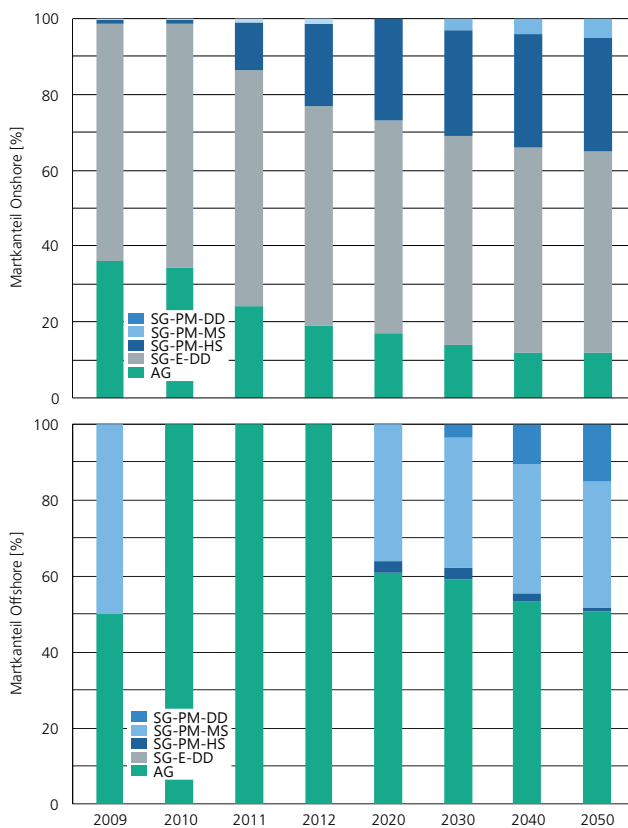


Abbildung 3: Technologie-Marktanteile im Szenario „Kontinuität“ (oben Onshore, unten Offshore)

Szenarien wurde für relevante Technologien der langfristige Zubaubedarf identifiziert. Hierfür wurden jeweils vier mögliche Ausbaupfade „niedrig“, „mittel“, „hoch“ und „sehr hoch“ bis zum Jahr 2050 abgeleitet und für jeden Pfad der zwischen 2011 und 2050 erforderliche Zubau (inkl. Ersatzanlagen) berechnet. Für die On- und Offshore-Windkraft ist dieser Zubau in Abbildung 2 dargestellt.

Zudem wurden für die relevanten Technologien Roadmaps entwickelt, in denen die zukünftigen Marktanteile und eine mögliche technische Entwicklung verschiedener Anlagentypen abgeschätzt wurden. Durch Verknüpfung des Zubaubedarfs mit den spezifischen Materialverbräuchen im Zeitablauf konnten die kumulierten Mengen an mineralischen Rohstoffen ermittelt und bewertet werden, die zur Herstellung der erforderlichen Kapazitäten bis 2050 benötigt werden.

Analyse der Windenergie

Ausbaupfade. Als eine der in Bezug auf die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen möglicherweise kritischen Technologien wurden einzelne Komponenten bzw. Subtechnologien der Windkraft identifiziert. Kritische Mineralien sind dabei Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy), die zunehmend in Generatoren mit Permanentmagneten (PM) verwendet werden. Diese dienen dazu, leistungsfähigere und leichtere Windenergieanlagen (WEA) einsetzen zu können. Für die Windenergie wurde für den Zeitraum 2011 – 2050 ein kumulierter Zubaubedarf für den niedrigen, mittleren, hohen und sehr hohen Pfad in Höhe von 59, 79, 106 und 282 GW (Onshore) bzw. 37, 62, 113 und 123 GW (Offshore) abgeleitet.

Marktentwicklung. Zur Abschätzung der zukünftigen Technologien und ihrer Marktanteile wurden drei Roadmaps für den deutschlandweiten Zubau bis 2050 entwickelt. Für den Onshore-Windmarkt bauen sie auf der Marktentwicklung von 2009 bis 2012 auf, für deren Ermittlung Daten von Fraunhofer IWES nach Herstellern und Anlagentypen ausgewertet und nach WEA-Klassen (siehe Tabelle 1) geordnet wurden. Die Bestimmung der Offshore-Marktanteile erfolgte auf Grundlage aller bekannten Offshore-Projekte in der deutschen Nord- und

Ostsee, für die zumindest eine Baugenehmigung erteilt wurde oder die sich bereits in der Planungs- oder Bauphase befinden. Die Roadmaps bauen auf drei Szenarien auf, um mögliche Bandbreiten der Entwicklung von technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen der Windkraft zu berücksichtigen.

Im Szenario „Kontinuität“ schwächt sich der Trend zu Anlagen mit immer höheren Nennleistungen ab, was sich aus rechtlich verbindlichen Höhenbegrenzungen ergeben könnte. Hieraus folgt ein weitgehender Erhalt der dezentralen Struktur der Onshore-Windkraftnutzung. Weil sich die technischen Anforderungen an eine WEA nicht maßgeblich ändern, lastet ein vergleichsweise geringer Innovationsdruck auf den Herstellern, so dass eine geringe Dynamik in der Veränderung von Marktanteilen angenommen wird (Abbildung 3). Auch Offshore wird von einem niedrigen Innovationsdruck und wenig Dynamik in der weiteren Entwicklung ausgegangen. Zu dieser Entwicklung könnte auch beitragen, dass das genannte Ziel von leistungsfähigeren und leichteren Anlagen technisch noch nicht erreicht werden kann.

Im Szenario „Upscaling“ verstärkt sich der Trend zu Großanlagen der 10 MW-Klasse, da durch größere Nabenhöhen und Rotor-durchmesser spezifischer Materialbedarf und Kosten erheblich gesenkt werden können. Die Problematik hoher Gondelgewichte führt zu einem Technologiewechsel Richtung PM-Generatoren (Abbildung 4). Onshore wird sich damit der seit 2010 zu beobachtende Trend fortsetzen. Offshore findet dieser Wechsel verstärkt statt, so dass Asynchronmaschinen in 2050 weitgehend durch PM-basierte Generatoren abgelöst worden sind.

Im Szenario „HTS“ wird zusätzlich der Fall einer signifikanten Nutzung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) angenommen (ohne Abbildung). HTS-Generatoren stünden im Falle ihrer Serienreife und ihres Markteintritts in direkter Konkurrenz zu getriebelosen SG-PM-Generatoren. Die Hersteller-Marktanteile sind daher identisch mit dem Szenario „Upscaling“. Die Anteile von SG-PM-DD-Generatoren werden in der Roadmap zugunsten von HTS-Generatoren mit Direktantrieb (HTS-DD) reduziert, die in 2050 onshore 12 % bzw. offshore 17 % Marktanteil erreichen.

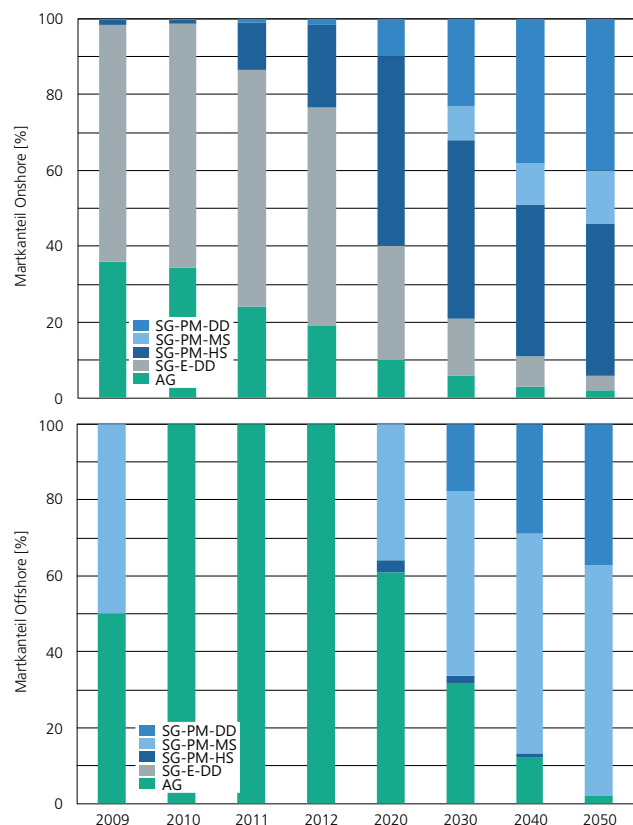


Abbildung 4: Technologie-Marktanteile im Szenario „Upscaling“ (oben Onshore, unten Offshore)

Erregung	Generatortyp	Antrieb	Abkürzung	Rohstoff	IST	2025	2050
Permanent erregt (PM)	Synchron (SG)	Direktantrieb	SG-PM-DD	Nd	201,5	162,5	130,0
				Dy	15,0	11,7	11,7
		Middle-speed Getriebe	SG-PM-MS	Nd	49,6	40,0	32,0
				Dy	3,7	2,9	2,9
		High-speed Getriebe	SG-PM-HS	Nd	24,8	20,0	16,0
				Dy	1,8	1,4	1,7
Elektrisch erregt (E)	Asynchron (AG)	High-speed Getriebe	AG	–			
		Direktantrieb	SG-E-DD	–			
	Synchron (SG)	Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) mit Direktantrieb	HTS-DD	Yttrium	–	2,3	2,3

Tabelle 1: Typisierung von Windenergieanlagen und Ergebnisse der Bestimmung des spezifischen Bedarfs kritischer mineralischer Rohstoffe für heutige und zukünftige Anlagen (in kg/MW)

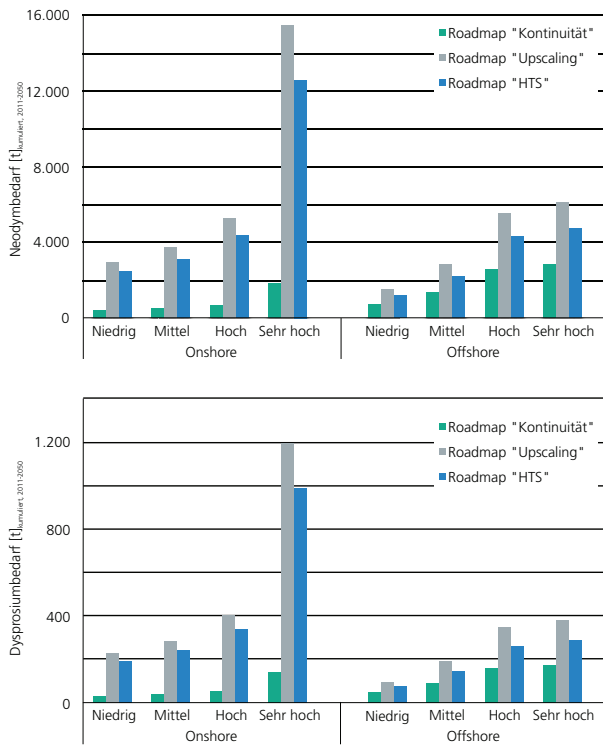


Abbildung 5: Kumulierter Neodym- und Dysprosiumbedarf der zwischen 2011 und 2050 in Deutschland neu installierten WEA

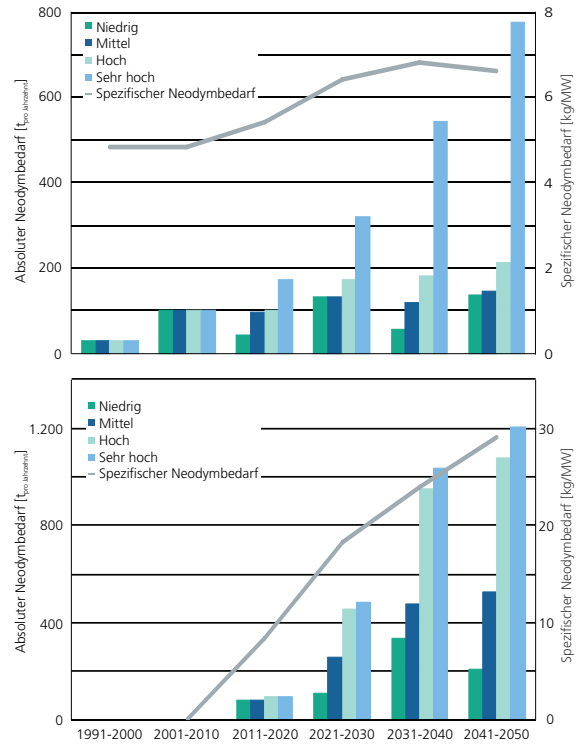


Abbildung 6: Neodymbedarf in Deutschland neu installierter Onshore- (oben) und Offshore- (unten) WEA in der Roadmap „Kontinuität“ (spezifisch und absolut, pro Jahrzehnt)

Entwicklung des spezifischen Verbrauchs an Seltenen Erden. Zur Gruppe der Seltenen Erden werden Lanthanoide wie Neodym (Nd), Dysprosium (Dy) und Yttrium (Y) gezählt. Seltene Erden sind, anders als der Name es vermuten lässt, nicht selten, sondern nicht oder kaum lagerstättenbildend. Dementsprechend kommen sie meist in geringen Konzentrationen vor und werden überwiegend als Nebenprodukt gewonnen. Nd und Dy werden in Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten für Synchrongeneratoren in WEA verwendet. Diese sogenannten Seltenerd-magneten haben den Vorteil einer hohen magnetischen Energiedichte, so dass geringere Generatorgewichte erreicht werden. Mengenmäßig dominieren Neodym und das chemisch wie physikalisch sehr ähnliche Praseodym. In geringeren Mengen werden auch Zusätze von Dysprosium und Terbium eingesetzt, um die Curietemperatur dieser Magnete zu erhöhen. Zur Ermittlung des Nd/Dy-Bedarfs von PM-Magneten wurden aufgrund von Literaturanalysen ihre Gewichte und spezifischen Bedarfe in heutigen WEA abgeschätzt (Tabelle 1). Werte für die Jahre 2025 und 2050 wurden aufgrund von Literaturangaben und Expertengesprächen angenommen, während die Feldstärke und die Dichte des Magneten und damit das spezifische Magnetgewicht als unverändert angenommen wurden.

Kumulierter Verbrauch von Neodym und Dysprosium. Abbildung 5 zeigt den über die gesamte Betrachtungsperiode kumulierten Bedarf an Nd und Dy. Dabei zeigt sich deutlich, dass der Bedarf an kritischen Rohstoffen nicht nur von der zukünftigen Höhe des Ausbaus der Windenergie abhängt, sondern – teilweise noch stärker – vom Technologiemix, der sich durchsetzen wird. Dies zeigt sich insbesondere beim Bedarf an Nd und Dy für Onshore-WEA: In der Roadmap „Kontinuität“ fallen gegenüber der Roadmap „Upscaling“ im gesamten Betrachtungszeitraum nur rund 12 bis 13 % des dort benötigten Nd- und Dy-Bedarfs an. Bei der Offshore-Windenergie sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Roadmaps geringer, da hier bereits im Rahmen der Roadmap „Kontinuität“ angenommen wird, dass diejenigen Generatortypen, die einen besonders hohen Bedarf an kritischen Rohstoffen haben („middle speed“ und „Direktantrieb“), signifikante Anteile am Neuanlagenmarkt erreichen werden.

Abbildung 6 verdeutlicht, dass der durchschnittliche spezifische Nd-Bedarf der *Onshore*-WEA in der Roadmap „Kontinuität“ zwischen 2001 und 2040 von zunächst rund 5 auf 7 kg/MW ansteigt. Im letzten Jahrzehnt sinkt er wieder leicht auf 6,4 kg/MW. Zwar sinken im Verlauf der gesamten Betrachtungsperiode infolge von Effizienzverbesserungen und Substitutionsbemühungen die durchschnittlichen spezifischen Verbrauchswerte aller einzelnen Generatortypen (Tabelle 1), durch die angenommene (weitere) Zunahme des Marktanteils von Generatoren mit PM-Magneten (vor allem „high speed“, aber auch „middle speed“) steigt dennoch bis ins vorletzte Jahrzehnt der spezifische Bedarf der neu zugebauten WEA. In den ersten *Offshore*-Anlagen in Deutschland, die im Jahr 2010 in Betrieb gegangen sind, wurden ausschließlich asynchrone Generatoren verbaut, so dass für das erste Jahrzehnt kein Nd bilanziert wurde. Danach steigt der durchschnittliche spezifische Bedarf der pro Jahrzehnt neu zugebauten Anlagen stetig auf knapp 30 kg/MW an, verursacht durch den im Zeitverlauf zunehmenden Anteil an Anlagen mit PM-Magneten (vor allem „middle speed“ und „Direktantrieb“). In der – nicht abgebildeten – Roadmap „Upscaling“ steigt der Bedarf durch den dort stattfindenden erheblichen Ausbau dieser Anlagen sowohl für Onshore als auch für Offshore auf knapp 70 kg/MW an.

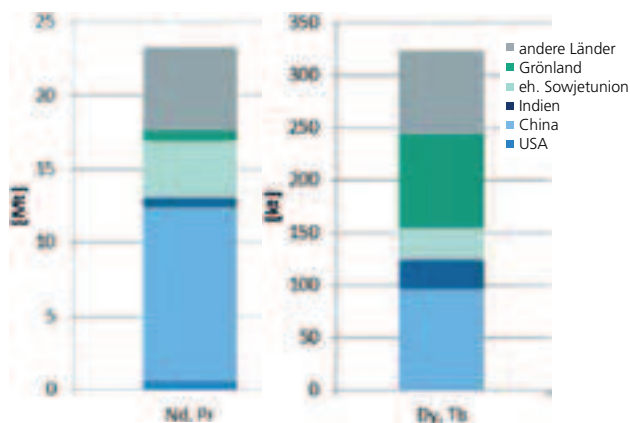


Abbildung 7: Verteilung der Reserven von Neodym inklusive Praseodym und von Dysprosium inklusive Terbium

Ressourcenbewertung

Betrachtet man lediglich die *geologische Verfügbarkeit*, können alle hier betrachteten Szenarien und Ausbaupfade für die Windenergienutzung in Deutschland umgesetzt werden, selbst wenn ein ähnlicher Ausbau der Windenergie auch für alle anderen Länder angenommen würde. Dabei wurde ein „Budgetansatz“ aus der Klimapolitik verwendet, indem die weltweiten Reserven und Ressourcen mit dem Bevölkerungsanteil Deutschlands gewichtet wurden, vermindert um Verbräuche aus anderen Sektoren.

Dagegen kann eine ausreichende *Versorgung* mit den benötigten Mengen für Deutschland nicht unbedingt garantiert werden. Zum einen ist die Ausbringung der Minen mit teilweise nur 10 % gering. Die im Prinzip in ausreichenden Mengen verfügbaren Mineralien bleiben so teilweise oder überwiegend ungenutzt. Zudem muss die sehr unterschiedliche Umweltpflege bei ihrer Gewinnung beachtet werden. Je nach abgebauten Mineralien, Aufbereitungstechnologien und Beimengungen anderer Materialien zu den abgebauten Mineralien besteht eine erhebliche Umweltbelastung beim Abbau von Nd und Dy. Zum anderen besteht eine hohe Abhängigkeit von wenigen Liefernationen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit (vgl. Abbildung 7). Insbesondere für Dy ist China die derzeit einzig relevante Fördernation. Derzeit ist unklar, ob sich weitere Lieferanten-Länder dauerhaft etablieren können und zu welchen Bedingungen der Abbau erfolgen würde (unter anderem Förderkosten, Qualität der Lagerstätten, Umweltgesetzgebung).

Alternativen. Trotz der Vorteile von Seltenerdsmagneten sollten daher aufgrund des mit dieser Abhängigkeit verbundenen Risikos auch etablierte oder neuartige Technologien ohne den Einsatz Seltener Erden weiterentwickelt werden.

- Für *Onshore*-Anlagen ist der Einsatz von Nd und Dy nicht unbedingt notwendig, da Probleme wie ein hohes Gondelgewicht und kostenintensive Wartungsarbeiten für Turbinen hauptsächlich *Offshore*-Anlagen betreffen. Zumindes kann der zuletzt sehr ansteigende Trend, auch *Onshore*-Anlagen mit PM-Magneten zu verwenden, nicht

mit den gleichen Anforderungen wie für Offshore-Anlagen begründet werden. Onshore könnten insbesondere in der 1 – 3 MW-Klasse weiterhin die unkritischen, elektrisch erregten Generatoren verwendet werden.

- Im Falle von *Offshore*-Anlagen könnten langfristig möglicherweise elektrisch-erregte Synchrongeneratoren eingesetzt werden, in denen HTS das Kupfer in den Rotorwindungen teilweise ersetzen und damit deutlich geringere Generatorgewichte und -volumen aufweisen als derzeit übliche direktangetriebene Synchrongeneratoren.

Solange (insbesondere im Offshore-Bereich) jedoch weiterhin Anlagen mit PM-Magneten verwendet werden, sollten sie möglichst recyclinggerecht konstruiert werden. Perspektivisch sollte die Entwicklung eines Recyclingsystems geprüft werden, um zumindest für den Ersatzbedarf in 20 – 30 Jahren auf recyceltes Nd und Dy zurückgreifen zu können. Hierbei gilt es jedoch für ein hochwertiges Recycling noch verfahrenstechnische Hürden zu überwinden.

Schlussfolgerungen

Die Studie macht insgesamt deutlich, dass die geologische Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe für den geplanten Ausbau der EE in Deutschland grundsätzlich keine limitierende Größe darstellt. Aufgrund möglicher Versorgungsengpässe kann jedoch möglicherweise nicht jede Technologievariante unbeschränkt zum Einsatz kommen. Neben der Windenergie wurden auch einzelne Technologien der Photovoltaik (Dünnschicht) sowie der Batteriespeicherung (Redox-Flow-Batterien auf Vanadium-Basis) als kritisch identifiziert. Für diese Technologien bestehen jedoch unkritische Alternativen, die in Zukunft verstärkt zum Einsatz kommen könnten oder bereits heute marktdominierend sind. Die Geothermie konnte mangels einer ausreichenden Datenbasis noch nicht beurteilt werden. Alle anderen Technologien aus dem Strom-, Wärme- und Verkehrssektor sind beim direkten Einsatz EE mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht als kritisch anzusehen. Generell wird jedoch vorgeschlagen, den Schwerpunkt bei der Sicherung der Rohstoffversorgung Deutschlands mittelfristig auf Effizienz-

und Recyclingstrategien zu legen. So sollte die Erhöhung der Ressourceneffizienz und die Recyclingfähigkeit bereits bei der Technologieentwicklung im Vordergrund stehen; zudem sollten die bereits vorhandenen Recyclingpotenziale genutzt werden. Jedes Recyclingverfahren ist jedoch mit teils beträchtlichen Materialverlusten sowie teilweise auch einem hohen Energieeinsatz verbunden. Neben Recyclingstrategien sollten daher in enger Zusammenarbeit mit der Industrie insbesondere auch Strategien zur Verlängerung von Nutzungs- und Lebensdauer erarbeitet werden.

Danksagung

Die Autoren danken den weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsprojektes „KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems“ für ihre Beiträge zur Erarbeitung der hier dargestellten Ergebnisse sowie BMU und BMWi für die Förderung des Projekts.

Literatur

Wuppertal Institut (2014): KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter Mitarbeit von Karin Arnold, Jonas Friege, Christine Krüger, Arjuna Nebel, Michael Ritthoff, Sascha Samadi, Ole Soukup, Jens Teubler, Peter Viebahn, Klaus Wiesen. <http://wupperinst.org/de/projekte/details/wi/p/s/pd/38/>. Wuppertal