



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

KRESSE

Kritische mineralische Ressourcen und
Stoffströme bei der Transformation des
deutschen Energieversorgungssystems /
*Critical Resources and Material Flows
during the Transformation of the German
Energy Supply System*

Abschlussbericht / Final Report

an das Bundesministerium für Wirtschaft und
Energie (BMWi)

Förderkennzeichen: 0325324

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung / Summary

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde unter dem Kennzeichen 0325324 mit Förderung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in 2012 begonnen und für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) abgeschlossen. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

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.

Autoren und Autorinnen

Forschungsgruppe 1 „Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“

Dr. Peter Viebahn (Projektleitung), Karin Arnold, Jonas Friege, Christine Krüger, Arjuna Nebel, Sascha Samadi, Ole Soukup

Forschungsgruppe 3 „Stoffströme und Ressourcenmanagement“

Michael Ritthoff

Forschungsgruppe 4 „Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren“

Jens Teubler, Klaus Wiesen

Mit Unterstützung durch

Julia Tenbergen (FG 1), Mathieu Saurat (FG 3, Review), Susanne Klein (FG 3), Monika Wirges (FG 4)

Übersetzung der Zusammenfassung durch Teresa Gehrs (LinguaConnect, Osnabrück)

Projektleitung

Dr. Peter Viebahn
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
Forschungsgruppe 1 „Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
Deutschland
Tel.: +49 202/2492-306
Fax: +49 202/2492-198
E-mail: peter.viebahn@wupperinst.org
Web: www.wupperinst.org

30.05.2014

Inhaltsverzeichnis / Content

Zusammenfassung	4
Summary	10

Zusammenfassung

Hintergrund

Im Energiekonzept der Bundesregierung wird den erneuerbaren Energien die Funktion einer „tragenden Säule einer zukünftigen Energieversorgung“ zugeschrieben. Ziel der Bundesregierung ist es, den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 auf 18 % und bis 2050 auf 60 % zu erhöhen. Betrachtet man nur die Stromerzeugung, soll hier der Anteil aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bis 2050 auf 80 % steigen. Für die Umsetzung der Energiewende und speziell den Ausbau erneuerbarer Energien sind jedoch nicht nur energiewirtschaftliche oder Klimaschutz-Kriterien maßgeblich, sondern es bedarf einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung der einzelnen Technologien unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien. Dies sind z. B. kurz- und langfristige Kostenaspekte, die Versorgungssicherheit, die Auswirkungen auf Landnutzung und Landschaftsbild, die Akzeptanz in der Gesellschaft, Umweltwirkungen sowie auch der Ressourcenbedarf.

Bei der *Ressourcenbewertung* ist unstrittig, dass die Gesamt-Ressourceninanspruchnahme eines Energiesystems generell erheblich niedriger ist, wenn dieses nicht auf fossilen, sondern auf erneuerbaren Energien basiert (und dabei nicht hauptsächlich auf Biomasse ausgerichtet ist). Ursächlich dafür ist hauptsächlich, dass die zur *Bereitstellung* von Endenergie (Strom, Wärme und Treibstoffe) eingesetzten fossilen Primärenergieträger als Ressourceninanspruchnahme zu werten sind. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass die erneuerbaren Energien 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. Von besonderem Interesse sind dabei sowohl die Verfügbarkeit von *Seltenen Elementen* wie z. B. Indium, Gallium, Lanthan oder Neodym als auch anderer *in ihrer Funktion wichtiger Rohstoffe* wie z. B. Nickel oder Vanadium.

Zielsetzung und Vorgehensweise der Studie

Die vorliegende Studie versucht, die bisherige Bewertungslücke zu schließen und damit einen Beitrag zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse erneuerbarer Energien zu leisten. Da Deutschland mit der Energiewende international eine Vorreiterrolle für viele andere Länder inne hat, war es Ziel der Studie, Hinweise darauf zu geben, ob und wie sich eine Energiewende mit hohem Ausbau erneuerbarer Energien ressourceneffizienter gestalten lässt.

Im Rahmen der Studie wurde dafür untersucht, welche „kritischen“ mineralischen Rohstoffe für die Herstellung von Technologien, die Strom, Wärme und Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien 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 nach vorliegenden Energieszenarien 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 erneuerbare Energien nicht *direkt* nutzen, wurden nicht betrachtet.

Die Analyse erfolgte unter Bezugnahme auf verschiedene Langfrist-Energieszenarien, die in den letzten Jahren für das Energiesystem in Deutschland erstellt wurden. Sie beschreiben unterschiedliche Pfade des Ausbaus erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2050, bis im Extremfall hin zur vollständigen Deckung des Strom- und Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien. Aus diesen Szenarien wurde für relevante Technologien der langfristige Zubaubedarf identifiziert. Darauf aufbauend wurden 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 für die Herstellung der erforderlichen Kapazitäten bis 2050 benötigt werden.

Gesamtbewertung

Die Studie macht deutlich, dass die geologische Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe für den geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland grundsätzlich keine limitierende Größe darstellt. Dabei kann jedoch möglicherweise nicht jede Technologievariante unbeschränkt zum Einsatz kommen.

Bewertung als *unkritisch*

Von den untersuchten Technologien haben sich mit hoher Wahrscheinlichkeit als *unkritisch* in Bezug auf die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen erwiesen:

- Nutzung im Stromsektor: Solarthermie, Wasserkraft, Windkraftanlagen ohne Seltenerd-magneten, siliziumbasierte kristalline Photovoltaik
- Nutzung im Wärmesektor: Geothermie, Solarthermie
- Infrastruktur: Stromnetze, einzelne Typen von Stromspeichern, alkalische Elektrolyse und SOFC-Brennstoffzellen

Zwar ist die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen bei der Nutzung von *Biomasse* und *Biokraftstoffen* im Strom- und Wärme- bzw. im Verkehrssektor ebenfalls nicht als kritisch einzustufen, doch müssten für deren Bewertung die Verfügbarkeit der Biomasse als solcher und die damit je nach Art der Biomasse verbundenen Probleme insbesondere der Flächennutzung und Nutzungskonkurrenz berücksichtigt werden, die nicht Gegenstand dieser Studie sind.

Bewertung als *kritisch*

Als *kritisch* in Bezug auf die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen wurden einzelne Komponenten bzw. Subtechnologien der *Windkraft*, der *Photovoltaik* sowie der *Batteriespeicherung* identifiziert. Für diese Technologien bestehen jedoch unkritische Alternativen, die in Zukunft verstärkt zum Einsatz kommen könnten oder bereits heute marktdominierend sind.

a) Windkraft

Die Windenergienutzung (onshore und offshore) wurde hinsichtlich des Verbrauchs von Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) untersucht, die zunehmend in Permanentmagneten hoher Feldstärke in Generatoren verwendet werden. Betrachtet man lediglich die *geologische Verfügbarkeit*, können alle hier betrachteten Szenarien und Ausbaupfade für die Windenergie-

nutzung in Deutschland umgesetzt werden, selbst wenn ein ähnlicher Ausbau der Windenergie auch für alle anderen Länder angenommen werden würde.

Doch trotz hoher Verfügbarkeit kann eine ausreichende *Versorgung* mit den benötigten Mengen für Deutschland jedoch nicht unbedingt garantiert werden. Zum einen ist die Ausbringung der Mineralien mit teilweise nur 10 % gering. Die im Prinzip in ausreichenden Mengen verfügbaren Mineralien bleiben so teilweise oder überwiegend ungenutzt. Zudem muss die sehr unterschiedliche Umweltperformance 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 Neodym und Dysprosium. Zum anderen besteht eine hohe Abhängigkeit von wenigen Liefernationen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit. Insbesondere für Dysprosium ist China die derzeit einzig relevante Fördernation. Dysprosium ist in Seltenerd-magneten jedoch notwendig, um die ansonsten sehr niedrige Curie-Temperatur von Neodym-Eisen-Bor-Magneten auf ein akzeptables Maß zu erhöhen. 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).

Trotz der Vorteile von Seltenerd-magneten (Ermöglichung leistungsfähigerer, leichterer Anlagen) sollten daher aufgrund des mit dieser Abhängigkeit verbundenen Risikos auch etablierte oder neuartige Technologien ohne den Einsatz von Seltenen Erden weiterentwickelt werden.

- Für *onshore*-Anlagen ist der Einsatz von Neodym und Dysprosium nicht unbedingt notwendig, da Probleme wie ein hohes Gondelgewicht und kostenintensive Wartungsarbeiten für Turbinen hauptsächlich *offshore*-Anlagen betreffen. Zumindest kann der zuletzt sehr ansteigende Trend, auch *onshore*-Anlagen mit Seltenerd-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 keramische Hochtemperatursupraleiter (HTS) das Kupfer in den Rotorwindungen teilweise ersetzen und damit deutlich geringere Generatorgewichte und -volumen aufweisen als derzeit übliche direktangetriebene Synchrongeneratoren. Daneben könnten außerdem Synchron-Reluktanzgeneratoren langfristig eine Rolle spielen. Diese Generatortypen benötigen keine Seltenen Erden und weisen gegenüber Asynchrongeneratoren einen besseren Wirkungsgrad und geringere Wärmeverluste auf.

Solange im *offshore*-Bereich Anlagen mit Seltenerd-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 Neodym und Dysprosium zurückgreifen zu können. Hierbei gilt es jedoch für ein hochwertiges Recycling noch verfahrenstechnische Hürden zu überwinden.

b) Photovoltaik

Die Photovoltaiknutzung wurde hinsichtlich des Verbrauchs von Indium (In), Gallium (Ga), Selen (Se), Silber (Ag), Cadmium (Cd) und Tellur (Te) untersucht. In der Bewertung wurde zwischen kristalliner Photovoltaik und Dünnschicht-Photovoltaik unterschieden.

- Kristalline Photovoltaik (siliziumbasiert)

Der Ausbau der siliziumbasierten kristallinen Technik, die 2012 in Deutschland einen Anteil von 97 % an den neu verkauften Anlagen hatte, ist prinzipiell unkritisch.
- Dünnschicht-Photovoltaik – CdTe-Zellen

Für Deutschland wurde aus verschiedenen Gründen ein Auslaufen der Technologie bis 2020 angenommen. Die bis zum Jahr 2020 benötigten Mengen an Cadmium und Tellur werden als unproblematisch angesehen.
- Dünnschicht-Photovoltaik – *Cl(G)S* (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid) - Zellen

Eine Deckung des Bedarfs an *Indium* erscheint langfristig nicht sichergestellt. Es besteht insbesondere eine große Nutzungskonkurrenz durch den zunehmenden Bedarf für die LCD-Fertigung und gleichzeitig eine hohe Abhängigkeit von einem Lieferland (China). Selbst die Beibehaltung des derzeitigen Marktanteils (3 % in 2012) dürfte – außer in einem niedrigen Ausbaupfad von bis 0,66 GW installierter Leistung in 2050 – schwer realisierbar sein. Eine Deckung des Bedarfs an *Selen* aus konventionellen Quellen erscheint unsicher, insbesondere da Selen nur als Nebenprodukt gewonnen wird, so dass zumindest ein hoher Ausbau dieser Dünnschicht-Technologie (bis zu 37 GW installierter Leistung in 2050) als kritisch anzusehen ist.
- Dünnschicht-Photovoltaik – a-Si-Zellen

Angesichts der oben dargestellten kritischen Aussichten für die Verfügbarkeit von Indium sollten die Bemühungen der Industrie unterstützt werden, das indiumhaltige ITO TCO-Substrat der a-Si Zellen durch andere leitfähige Substrate zu ersetzen.

Falls die Dünnschicht-Technologie als zukünftig marktrelevant eingeschätzt wird, sollte daher die Forschung für indium- und selenfreie bzw. indium- und selenreduzierte Dünnschicht-Zellen weiter vorangetrieben werden. Gleichzeitig sollte die Industrie motiviert werden, Photovoltaikanlagen recyclinggerecht zu konstruieren und auf die Anforderungen der seit 2014 in der EU auch für Photovoltaikanlagen geltenden WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment) abzustellen. Um generell den Materialverbrauch von Photovoltaik-Systemen weiter zu senken, sollten sie verstärkt in andere Anwendungen integriert werden (z. B. Fassaden, Dächer, semitransparente Abdeckungen bzw. Verglasungen oder Verschattungseinrichtungen).

c) Stromspeicherung

Die Stromspeicherung wurde hinsichtlich des Verbrauchs von Lithium (Li), Vanadium (V), Nickel (Ni), Kalium (Ka), Lanthan (La) und Yttrium (Y) am Beispiel eines Systems mit „sehr hohem“ Ausbau von Windkraft und Photovoltaik untersucht. Dabei wurden Batteriespeicher zur kurzfristigen, großskaligen Speicherung (Redox-Flow-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien) und die alkalische Elektrolyse und Wasserstoff-Speicherung mit Rückverstromung durch SOFC-Brennstoffzellen für die mittel- und langfristige Speicherung betrachtet.

- **Batterie-Speicherung (großskalig)**

Die Rohstoffversorgung für die derzeit gängigen Redox-Flow-Batterien auf Vanadium-Basis ist als kritisch anzusehen. Es besteht insbesondere eine große Nutzungskonkurrenz, da Vanadium ein wichtiges Legierungselement z. B. für Werkzeugstähle ist. Demgegenüber gibt es mit China, Südafrika und Russland nur drei relevante Förderländer. Es wird empfohlen, für *Kurzzeitspeicher* die aus Sicht der Ressourcenverfügbarkeit unkritischeren Lithium-Ionen-Batterien oder physikalische Speicher (Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher) zu verwenden, solange keine Redox-Flow-Batterien mit Vanadium-freien oder -reduzierten Elektrolyten für den gleichen Zweck zur Verfügung stehen. Entsprechende Alternativen sind in der Entwicklung, es kann jedoch noch nicht eingeschätzt werden, ob und wann sie sich am Markt durchsetzen werden. Bei der Forschung steht insbesondere die Skalierbarkeit auf große Leistungen und die Speicherkapazität im Vordergrund.

- **Alkalische Elektrolyse und Wasserstoff-Speicherung mit Rückverstromung durch SOFC**

Hinsichtlich der *Langzeitspeicherung* ist der untersuchte Wasserstoffpfad als voraussichtlich unkritisch anzusehen.

Bewertung *noch nicht möglich*

Hinsichtlich der *geothermischen Stromerzeugung* kann im Fall eines starken Zubaus ein relevanter Bedarf an verschiedenen kritischen Legierungselementen zumindest nicht ausgeschlossen werden. Verschiedene Argumente sprechen dafür, die geothermische Stromerzeugung in Hinblick auf ihren zukünftigen Bedarf an Stahllegierungen (auch im Vergleich zur Windkraft) als „relevant“ einzuschätzen: Hierzu gehören der hohe spezifische Stahlbedarf tiefegeothermischer Anlagen sowie die schlechte Substituierbarkeit von Legierungen durch teilweise hohe technische Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe. Für eine richtungssichere Hochrechnung dieses Bedarfs ist die Datenbasis allerdings noch nicht ausreichend, so dass für Geothermie derzeit keine Aussage getroffen werden kann.

Schlussfolgerungen

Während der Wärme- und der Verkehrssektor beim *direkten Einsatz* erneuerbarer Energien mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht als kritisch anzusehen sein wird, sollte mit Bezug auf die aufgeworfene Untersuchungsfrage ein Augenmerk auf den Stromsektor gelegt werden. Auch wenn die Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe für die relevanten Technologien kein Problem darstellt, sollten mögliche Versorgungsrisiken aufgrund von Abhängigkeiten von wenigen Lieferländern und Nutzungskonkurrenzen beachtet werden. Obwohl hier derzeit kein dringender Handlungsbedarf gegeben ist, sollten die abgeleiteten Handlungsempfehlungen aufgrund der langen Vorlaufzeit in Forschung und Entwicklung zügig umgesetzt werden, so dass „kritische“ Situationen im Stromsektor „von vornherein“ vermieden werden können.

Einen zentralen Aspekt der in der Studie abgeleiteten Politikempfehlungen bildet der Vorschlag, 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. In vielen Fällen (z. B. bei Seltenerdmetallen) fällt ein hochwertiges Recycling auch insgesamt schwer. Neben Recyclingstrategien sollten daher insbesondere auch Strategien zur Verlängerung von Nutzungs- und Lebensdauer treten. Hier bedarf es einer engen Zusammenarbeit mit der Industrie.

Der Forschung wird insbesondere empfohlen, die hier vorgelegte Analyse auf weitere Sektoren und Produkte auszudehnen, für die mineralische Rohstoffe nachgefragt werden, Langfrist-Energieszenarien mit Ressourcenanalysen zu verknüpfen und Konzepte zur generellen Ressourcenminimierung beim Umbau des Energiesystems zu entwickeln.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass alle hier gezeigten Ergebnisse unter dem Vorbehalt stehen, dass die Annahmen und Daten zur Ressourcensituation äußerst unsicher sind und jegliche Fortschreibung über einen so langen Zeitraum daher mit Vorsicht betrachtet werden sollte. Zudem stellen die dargestellten Szenarien und Roadmaps zur Technologie- und Marktentwicklung naturgemäß keine „Prognose“ im engeren Sinne dar, sondern sind als mögliche Entwicklungspfade zu verstehen, die von vielen Annahmen abhängig sind.

Summary

Background

The Federal Government's energy concept ascribes renewable energies the role of an "important pillar of future energy supply". According to targets set by the Federal Government, renewable energies are to account for 18 per cent of gross final energy consumption by 2020, rising to 60 per cent by 2050. If only electricity generation is considered, the proportion of gross electricity consumption contributed by electricity from renewable energy sources is to increase to 80 per cent by 2050. However, it is not only energy supply or climate protection criteria that play a crucial role in realising the energy turnaround and, in particular, the development of renewable energy sources – a comprehensive sustainability assessment of the individual technologies must be made taking into account a variety of criteria. Such criteria include short- and long-term cost considerations, energy security, the impact on land use and the countryside, social acceptability, environmental impacts and resource requirements.

When it comes to *resource assessments*, it is recognised that the overall resource utilisation of an energy system is generally considerably lower if it is based on renewable energies (albeit not primarily on biomass) rather than on fossil fuels. The main reason for this is that the primary fossil energy sources deployed for the *provision* of final energy (electricity, heat and fuels) should be considered as resource utilisation. However, this does not necessarily mean that renewable energies must always be considered as being unproblematic with regard to the use of resources. In particular, limited research has been undertaken on the consumption and long-term availability of *minerals*, usually required in the *manufacture* of energy converters and infrastructure. In this connection, the availability of *rare earth elements*, such as indium, gallium, lanthanum and neodymium, and other *raw materials that play a significant role*, such as nickel and vanadium, is of particular interest.

Objective of the study and the approach taken

The present study attempts to close the previous assessment gap, contributing to the holistic sustainability analysis of renewable energies. Since Germany's energy turnaround means the country assumes a pioneering role on the international arena, the aim of the study was to provide an indication as to whether and how the transformation of the energy supply system can be shaped more resource-efficiently with a high degree of expansion of renewable energies.

To achieve this, the study involved investigating which "critical" minerals are relevant in Germany for the production of technologies that generate electricity, heat and fuels from renewable energies in a time perspective up to 2050. In this connection, the assessment of being "critical" comprises the long-term availability of the raw materials identified, the supply situation, recyclability and the environmental conditions governing their extraction. In the first instance, all technologies referred to in existing energy scenarios in Germany that may be used in the decades ahead were included in the analysis, supplemented by infrastructure such as energy storage systems and electricity grids. Secondary applications such as batteries in electric vehicles that do not make *direct* use of renewable energies were not taken into consideration.

The analysis was undertaken with reference to different long-term energy scenarios created in recent years for the energy supply system in Germany. These scenarios describe different

trajectories for the development of renewable energies up to 2050, right up to the extreme case of the full coverage of electricity and heat requirements from renewable energies. The long-term need for new capacities was identified from these scenarios for relevant technologies. Based on these findings, roadmaps were developed in which the future market shares and the possible technological development of different types of plant were estimated. Linking the need for new capacities to specific material consumptions over time enabled cumulated quantities of minerals required to produce the necessary capacities by 2050 to be determined and assessed.

Overall assessment

The study shows that the geological availability of minerals does not generally represent a limiting factor in the planned expansion of renewable energies in Germany. It may not be possible, however, for each technology variant to be used to an unlimited extent.

Assessment as being *non-critical*

Of the technologies investigated, the following have proven to be most probably *non-critical* with regard to the supply of minerals:

- Use in the electricity sector: solar thermal energy, hydropower, wind turbines without rare earth magnets, silicon-based crystalline photovoltaics
- Use in the heating sector: geothermal energy, solar thermal energy
- Infrastructure: electricity grids, specific types of electricity storage devices, alkaline electrolysis and solid oxide fuel cells

The supply of minerals in the use of *biomass* and *biofuels* in the electricity, heat and transport sectors cannot be classified as being critical either. However, the availability of biomass itself and the associated problems, especially land use and competitive usage, depending on the type of biomass, would have to be taken into account. These are not within the scope of this study though.

Assessment as being *critical*

Specific elements or sub-technologies of *wind energy*, *photovoltaics* and *battery storage* were identified as being *critical* with regard to the supply of minerals. However, there are non-critical alternatives to these technologies that could increasingly be used in future or that already dominate the market.

a) Wind energy

The use of wind energy (both onshore and offshore) was investigated with regard to the consumption of neodymium (Nd) and dysprosium (Dy), which are increasingly being employed in high field strength permanent magnets in generators. If only *geological availability* is taken into consideration, all of the scenarios and trajectories considered here for wind energy utilisation in Germany can be implemented, even if a similar expansion of wind energy is also assumed for all other countries.

In spite of a high degree of availability, however, an adequate *supply* of the required quantities cannot necessarily be guaranteed for Germany. On the one hand, recovery from mines

is poor, in some cases only 10 per cent. Hence the minerals, available in sufficient quantities in principle, remain partially or predominantly unused. In addition, the very different environmental performance involved in their extraction must be borne in mind. Depending on the minerals extracted, processing technologies and additions of other materials to the minerals extracted, the mining of neodymium and dysprosium has a considerable environmental impact. On the other hand, there is excessive dependence on a few supplier states with a concomitant effect on security of supply. China is the only relevant dysprosium-producing country at present, for example. However, dysprosium is necessary in rare earth magnets in order to increase the otherwise very low Curie temperature of neodymium iron boron magnets to an acceptable level. It is currently unclear whether other supplier countries will be able to become established in the long run and under which conditions the mineral would be extracted (production costs, quality of storage sites, environmental legislation, and so on).

In spite of the advantages of rare earth magnets (enabling more powerful, lighter facilities), established or novel technologies that do not involve the use of rare earths should therefore also be further developed, due to the risk associated with such a dependence.

- The use of neodymium and dysprosium is non-essential for *onshore* facilities, since problems such as very heavy nacelles and expensive maintenance work for turbines mainly affect offshore facilities. At the very least, the recent rapidly growing trend of also using onshore facilities with rare earth magnets cannot be justified by the same requirements as for offshore facilities. Non-critical, electrically excited generators could still be used onshore, particularly in the 1 to 3 MW class.
- In the case of *offshore* facilities, electrically excited synchronous generators could perhaps be used in the long run; here ceramic high temperature superconductors (HTS) partially take the place of copper in the rotor coils, exhibiting much lower generator weights and volumes than the current direct-drive synchronous generators. In addition, synchronous reluctance generators could also play a role in the long term. These types of generator do not require any rare earths, and achieve better efficiency and less heat loss than asynchronous generators.

As long as facilities with rare earth magnets are used offshore, they should ideally be designed to be recyclable. Looking forward, the development of a recycling system ought to be tested so that at least recycled neodymium and dysprosium can be resorted to in 20 to 30 years' time for replacement purposes. In this connection, it is essential to overcome procedural hurdles to facilitate top-quality recycling.

b) Photovoltaics

The use of photovoltaics was explored with regard to the consumption of indium (In), gallium (Ga), selenium (Se), silver (Ag), cadmium (Cd) and tellurium (Te). In the assessment, a differentiation was made between crystalline photovoltaics and thin-film photovoltaics.

- Crystalline photovoltaics (silicon-based)
The expansion of the silicon-based crystalline technology, which accounted for 97 per cent of new systems purchased in Germany in 2012, is non-critical in principle.
- Thin-film photovoltaics – CdTe cells

It was assumed for various reasons that the technology would be phased out in Germany by 2020. The quantities of cadmium and tellurium required up to 2020 are regarded as unproblematic.

- Thin-film photovoltaics – CI(G)S (copper indium gallium diselenide) cells

The demand for *indium* does not appear to be secured in the long term. In particular, there is a major competitive usage due to increasing demand in LCD production, and simultaneously a high dependence on one supplier country (China). It would even be difficult to maintain the current market share (3 per cent in 2012) – apart from in a low trajectory of up to 0.66 GW installed capacity in 2050. It appears uncertain whether the need for *selenium* can be met from conventional sources, particularly because selenium is only obtained as a by-product. Hence a major expansion of this thin-film technology (up to 37 GW installed capacity in 2050) at least must be considered as being critical.

- Thin-film photovoltaics – a-Si cells

In view of the prospects for the availability of indium as presented above, the efforts of the industry to replace the indium-based ITO TCO substrate of a-Si cells with other conductive substrates ought to be supported.

If thin-film technology is viewed as being relevant to the market in the future, further research should therefore be conducted on thin-film cells with no or little indium or selenium. At the same time, the industry should be encouraged to design recyclable photovoltaic solar systems and to apply the requirements set out in the WEEE Directive (Waste Electrical and Electronic Equipment), which has also applied to photovoltaic solar systems in the EU since 2014. In order to further reduce the material consumption of photovoltaic systems in general, they should increasingly be integrated in other applications (for example, façades, roofs, semi-transparent coverings, glazing or shading devices).

c) Electricity storage

Electricity storage was investigated with regard to the consumption of lithium (Li), vanadium (V), nickel (Ni), potassium (K), lanthanum (La) and yttrium (Y) using the example of a system with a “very high” level of expansion of wind energy and photovoltaics. In this connection, consideration was given to battery storage for short-term, large-scale storage (redox flow batteries and lithium-ion batteries) and to alkaline electrolysis and hydrogen storage with reconversion in solid oxide fuel cells for medium- and long-term storage.

- Battery storage (large-scale)

Raw material supply for commonly available vanadium-based redox flow batteries must be considered as being critical. In particular, there is a major competitive usage because vanadium is an important alloying element, e.g. for tool steels. This is compounded by the fact that there are only three relevant producer countries, namely China, South Africa and Russia. It is recommended to use lithium-ion batteries, which are considered to be less critical from the perspective of resource availability, or physical storage facilities (pumped storage plants, compressed air reservoirs) for *short-term storage*, as long as no redox flow batteries with vanadium-free or -reduced electrolytes are available for the same purpose. Relevant alternatives are at the development stage; it is not yet possible

to gauge whether these will succeed on the market, and if so, when. Research focuses primarily on scalability to high performance and storage capacity.

- Alkaline electrolysis and hydrogen storage with reconversion in solid oxide fuel cells

In terms of *long-term storage*, the analysed hydrogen trajectory is expected to be considered as being non-critical.

Assessment not yet possible

With regard to *geothermal electricity generation*, a relevant demand for various critical alloying elements cannot at least be ruled out in the case of a major expansion. There are several arguments in favour of assessing geothermal electricity generation as “relevant” with regard to its future demand for steel alloys (also compared to wind power): such arguments include the high demand for specific steel in deep geothermal energy plants and the poor substitutability of alloys, due in part to the high technical demands placed on the materials used. However, the data base is as yet inadequate for forecasting this demand reliably, meaning that no conclusions can be drawn at present for geothermal energy.

Conclusions

Whilst the heating and transport sectors are most probably not considered as being critical in the event of the *direct use* of renewable energies, attention needs to be paid to the electricity sector with reference to the research question raised. Even if the availability of minerals for the relevant technologies is not a problem, potential supply risks owing to dependencies on a few supplier countries and competitive usages should be borne in mind. Although there is no urgent need for action in this case at present, the recommendations for action derived from the study should be implemented swiftly due to the long lead time inherent in research and development, enabling “critical” situations in the electricity sector to be avoided from the outset.

One central aspect of the policy recommendations derived from the study is the proposal to focus in the medium term on efficiency and recycling strategies in the bid to secure Germany’s raw material supply. For example, increasing resource efficiency and recyclability should be key elements of technology development, and existing potential for recycling should also be exploited. However, every recycling process entails a considerable loss of material in some cases as well as a high energy input. In many cases (for example, where rare earth magnets are concerned) top-quality recycling is altogether difficult. For this reason, strategies for prolonging the useful life and life cycle of systems should be pursued alongside recycling strategies. In this case, close cooperation with industry is required.

Researchers are particularly recommended to extend the analysis presented here to additional sectors and products for which minerals are required, to combine long-term energy scenarios with resource analyses, and to develop schemes for generally minimising the use of resources in the transformation of the energy system.

Finally, it should be noted that all of the findings shown here are subject to the provision that the assumptions and data concerning the resource situation are highly uncertain, and that any projection over such a long period should therefore be treated with caution. In addition, it goes without saying that the presented scenarios and roadmaps concerning technology and

market development do not constitute “forecasts” in the narrow sense, but shall be viewed as possible trajectories that are contingent upon many assumptions.