

## Schlussbericht zu Nr. 8.2

<b>ZE:</b> Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH	<b>Förderkennzeichen:</b> 0325324
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Kritische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems (KRESSE)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 – 30.06.2014	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.02.2012 – 30.06.2014	

### I. Kurze Darstellung zu

#### 1 Aufgabenstellung

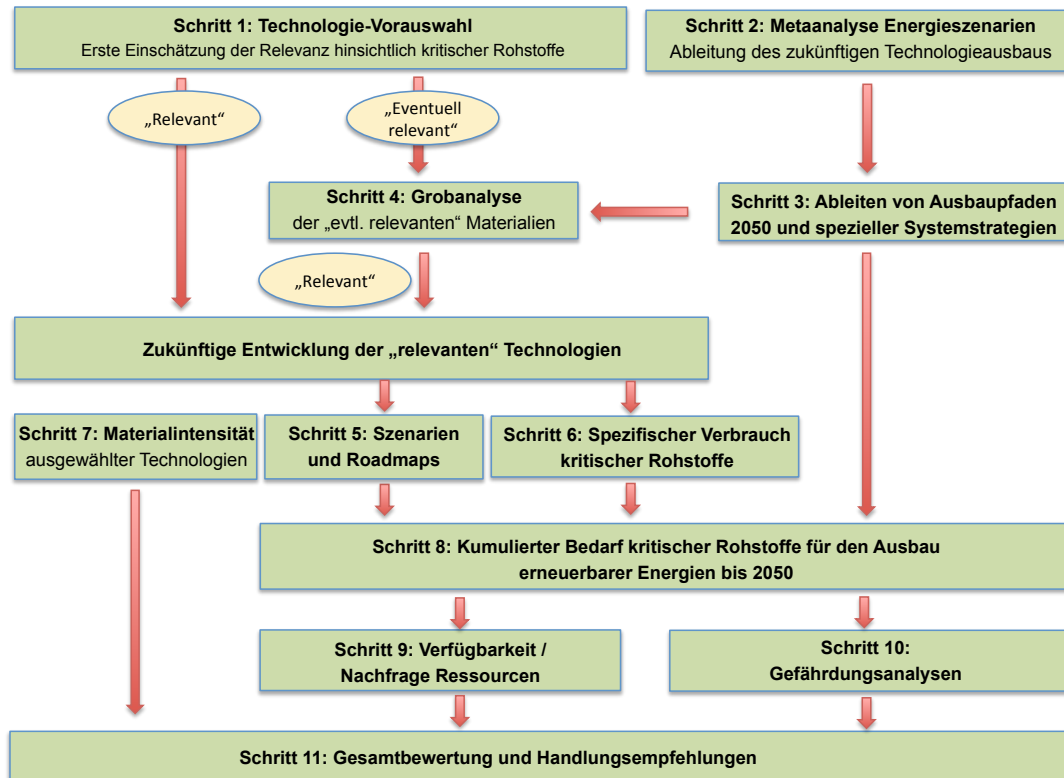
In der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, welche „kritischen“ mineralischen Rohstoffe für die Herstellung von Technologien, die Strom, Wärme und Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien erzeugen, bei einer zeitlichen Perspektive bis zum Jahr 2050 in Deutschland relevant sind. Die Einschätzung 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.

#### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bei der Ressourcenbewertung von Energiesystemen 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). 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, wurde bisher wenig untersucht. Diese bislang existierende Bewertungslücke war damit Ausgangspunkt des Vorhabens.

#### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in verschiedene Arbeitspakete unterteilt, die in folgendem Zusammenhang standen:



#### 4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insb.

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,

-----

- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,

Die verwendete Literatur ist im Literaturverzeichnis des Abschlussberichts aufgelistet (rund 220 Quellen).

#### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Um eine enge Abstimmung mit der einschlägigen Industrie und betroffenen Behörden (BGR, UBA) zu gewährleisten, wurde über die Dauer des Projektes ein Begleitkreis eingerichtet. Er wurde während der Projektlaufzeit dreimal einberufen, so dass mit den Mitgliedern der Projektablauf sowie die erarbeiteten Ergebnisse kritisch diskutiert werden konnten. Teilgenommen haben Vertreter der Firmen Enercon, Solarworld Innovations, Flagsol, Siemens, Vertreter von BGR und UBA sowie der Uni Bremen.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung bestand im Wesentlichen (97,1%) aus Personalkosten, die zielgerichtet für die Durchführung der verschiedenen Arbeitspakete (siehe Grafik in Punkt I.3) verwendet wurde. Die gesetzten Ziele wurden erreicht, weitergehende Forschungsfragen, die sich im

Projektverlauf ergeben haben, wurden in die „Empfehlungen“ mit aufgenommen.

#### Schritt 1: Technologie-Vorauswahl (Kapitel 2)

In einer ersten Grobabschätzung wurden alle in Deutschland in Frage kommenden Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien, ergänzt um Infrastrukturanlagen, in drei Relevanz-Stufen hinsichtlich des Verbrauchs möglicherweise kritischer mineralischer Rohstoffe eingeordnet: (1) relevant, (2) eventuell-relevant, (3) nicht-relevant. Die Einschätzung baut auf einer Metaanalyse existierender Studien zum Einsatz kritischer Rohstoffe auf. Die nicht-relevanten Technologien wurden im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet. Für die „eventuell-relevanten“ Technologien wurde in Schritt 4 eine Grobanalyse hinsichtlich ihrer Relevanz durchgeführt. Die „relevanten“ Technologien wurden in Schritt 5 weiter bearbeitet.

#### Schritt 2: Metaanalyse von Langfrist-Energieszenarien für Deutschland (Kapitel 3)

Zur Beurteilung des beim Ausbau der erneuerbaren Energien anfallenden Bedarfs an möglicherweise kritischen mineralischen Rohstoffen wurde ein Mengengerüst der jeweils einzusetzenden Technologien benötigt. Parallel zu Schritt 1 wurde daher in diesem Schritt eine Metaanalyse neun existierender Langfrist-Energieszenarien durchgeführt, um für die als „relevant“ oder „eventuell-relevant“ eingeschätzten Technologien plausible Spannbreiten für das Ausmaß ihres möglichen Zubaus bis zum Jahr 2050 ableiten zu können. Nachdem sich in Schritt 1 herausgestellt hatte, dass nur Stromerzeugungstechnologien in der Auswahl vertreten sind, wurde der Fokus speziell auf Langfrist-Szenarien der Stromerzeugung gelegt.

#### Schritt 3: Ableitung von jeweils drei exemplarischen Technologie-Ausbaupfaden (Kapitel 3)

Aufgrund der in den Szenarien abgebildeten Unsicherheit beim zukünftigen Ausbau der Technologien wurden aus den in Schritt 2 betrachteten Langfristszenarien für verschiedene Stromerzeugungstechnologien drei mögliche zukünftige Technologie-Ausbaupfade „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ abgeleitet. Betrachtet wurden hierbei Biomasse, Photovoltaik, Geothermie und Windkraft (getrennt nach onshore und offshore). Da zwei Sonderfälle des Ausbaus erneuerbarer Energien in den analysierten Energieszenarien nicht enthalten waren, wurden zusätzlich zwei „spezielle Systemstrategien“ zum „besonders hohen Ausbau von Windkraft- und PV-Anlagen“ und zum „Import von solarthermisch erzeugtem Strom“ ergänzt.

#### Schritt 4: Grobanalyse der „eventuell-relevanten“ Technologien (Kapitel 4, 5)

Für die in Schritt 1 als „eventuell-relevant“ identifizierten Technologien wurde jeweils in einer Grobanalyse abgeschätzt, ob die enthaltenen mineralischen Rohstoffe beim langfristig anvisierten Ausbau der jeweiligen Technologie entsprechend der in Schritt 3 definierten Ausbaupfade als „kritisch“ eingestuft werden müssten. Zusätzlich wurden alle Technologien auf ihren Bedarf an Stahllegierungselementen hin geprüft.

#### Schritt 5: Zukünftige Entwicklung der „relevanten“ Technologien – Entwicklung von Szenarien und Roadmaps (Kapitel 6)

Für die in Schritt 1 und in Schritt 4 ausgewählten „relevanten“ Technologien (Photovoltaik und Windkraft) wurden in diesem Schritt mögliche Szenarien und Roadmaps für die langfristige Entwicklung der Stromerzeugungskapazität dieser Technologien hergeleitet. Während die Szenarien jeweils ein mögliches zukünftiges Marktumfeld in Form z. B. technischer, rechtlicher oder ökonomischer Rahmenbedingungen für die jeweilige Technologie grob skizzieren, stellen die Roadmaps mögliche quantitative Marktentwicklungen der Anteile verschiedener Subtechnologien in diesem Marktumfeld dar.

#### Schritt 6: Zukünftige Entwicklung der „relevanten“ Technologien – Entwicklung des spezifischen Verbrauchs kritischer Rohstoffe (Kapitel 7)

Für die bei den „relevanten“ Technologien identifizierten „kritischen“ mineralischen Rohstoffe wurde in diesem Schritt ein möglicher zeitlicher Verlauf des jeweiligen Verbrauchs pro Anla-

ge abgeleitet. Dabei wurden zunächst relevante Anlagentypen identifiziert, um anschließend deren jeweiligen spezifischen Ressourcenbedarf bis zum Jahr 2050 abzuschätzen.

Schritt 7: Ergänzende Analyse der Materialintensität ausgewählter Technologien nach dem MIPS-Konzept (Kapitel 8)

Für Anlagen, die aus Ressourcensicht als möglicherweise kritisch einzuschätzen sind, wurden in diesem Schritt bestehende Lebenszyklusanalysen im Hinblick darauf analysiert, inwieweit sie die Rohstoffseite ausreichend abbilden. Für ausgewählte Windkraft- und Photovoltaikanlagen, die nicht den gewählten Kriterien hinsichtlich der Qualität und des Umfangs für eine Rohstoffbilanzierung entsprechen, wurde der lebenszyklusweite Einsatz abiotischer Rohstoffe nach dem MIPS-Konzept untersucht.

Schritt 8: Ermittlung des kumulierten Bedarfs kritischer Rohstoffe für den Ausbau erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2050 (Kapitel 9)

In diesem Schritt wurde für die als „relevant“ erachteten Technologien deren voraussichtlicher kumulierter Bedarf an kritischen Rohstoffen bis zum Jahr 2050 errechnet. Dabei wurden die in Schritt 3 aus vorliegenden Szenariostudien abgeleiteten Technologie-Ausbaupfade mit den in Schritt 5 abgeleiteten Roadmaps sowie den in Schritt 6 bestimmten dynamischen spezifischen Verbräuchen kritischer Rohstoffe für diese Technologien kombiniert.

Schritt 9: Verfügbarkeit und Nachfrage nach Ressourcen (Kapitel 10)

In diesem Schritt wurden die Verfügbarkeiten und mögliche Nachfrageentwicklungen untersucht. Ziel war es, für die wichtigsten hier betrachteten mineralischen Rohstoffe möglicherweise drohende Versorgungsengpässe und Ressourcenkonflikte zu identifizieren und wenn möglich zu quantifizieren. Durch die Verknüpfung von produktlinienbezogenen und makroökonomischen Informationen werden insbesondere bestehende Wissenslücken geschlossen, die mögliche Auswirkungen von Wachstum und Bestandsaufbau erneuerbarer Energien auf deren Ressourceneinsatz und Umweltverträglichkeit betreffen.

Schritt 10: Gefährdungsanalysen (Kapitel 11)

In diesem Schritt wurden ergänzende Untersuchungen zum Gefährdungspotenzial durch die kritischen Stoffe selbst sowie durch die in der Prozesskette eingesetzten Stoffe durchgeführt.

Schritt 11: Gesamtbewertung und Handlungsempfehlungen (Kapitel 12)

Abschließend wurden die betrachteten langfristigen Ausbaupfade im Hinblick darauf bewertet, ob ihre Umsetzung vor dem Hintergrund der durchgeführten Ressourcenanalyse unkritisch ist oder ob sie möglicherweise nur eingeschränkt erfolgen kann. Aus den Ergebnissen der Analyse wurden Handlungsempfehlungen für Politik, Industrie und Wissenschaft erstellt.

## **2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

97,1% der Zuwendung wurden für Personalkosten (366.635 Euro), 2,9% für Reisen und sonstige unmittelbare Vorhabenskosten (z.B. Datensätze) (11.046 Euro) verwendet.

## **3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleistete Arbeit war notwendig und angemessen, da es bisher keine vergleichbaren Ergebnisse für den Ressourcenverbrauch beim Umbau des Energieversorgungssystems in Deutschland gab (siehe auch Darstellung im Projektangebot sowie im unten genannten referierten Artikel).

## **4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Als wissenschaftliche Organisation konzentriert sich das Verwertungsinteresse des Instituts

auf die wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse.

- Die Veröffentlichungen im Rahmen des fortgeschriebenen Verwertungsplanes werden in Punkte 6 aufgelistet.
- Die Ergebnisse des Projektes wurden am 11. November 2014 auf dem European Resource Forum in Berlin vorgestellt.
- Es ist geplant, die Ergebnisse auf weiteren Tagungen oder Workshops vorzustellen, wenn sich in 2015 die Gelegenheit hierzu ergibt. Bereits eingeplant ist ein Vortrag auf der AMREN-1 Konferenz im Mai 2015 in Lille („Advanced materials and technologies for renewable energies“)
- In einer Expertenanhörung des UBA-Projekts SimRess („Modelle, Potenziale und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz“) wurden am 14. November in Berlin die Vorgehensweise und die Projektergebnisse hinsichtlich der Bewertung von Photovoltaik und Windenergie vorgestellt und diskutiert.

**5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

---

**6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.**

- Vorgehensweise und Ergebnisse wurden Ende Mai 2014 in einem Abschlussbericht (siehe „Kurzfassung“) veröffentlicht.
- Im Dezember 2014 wurde ein wissenschaftlicher Artikel in der peer-reviewten Zeitschrift Renewable & Sustainable Energy Reviews eingereicht („Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables“). Dieser Artikel soll nach open-access Kriterien veröffentlicht werden, so dass für jede/n Interessentin/en uneingeschränkter Zugriff besteht.
- Weiterhin ist geplant, einen Artikel in einer deutschsprachigen Fachzeitschrift zu veröffentlichen (z.B. Energiewirtschaftliche Tagesfragen).
- Aufgrund der Veröffentlichung des Abschlussberichts erfolgten mehrere Anfragen nach einer Kurzdarstellung der Projektergebnisse. Hieraus ergaben sich folgende Veröffentlichungen:
  - a. Beitrag "I Minerali indispensabili per le energie rinnovabili" in der ital. sprachigen Zeitschrift Ecoscienza mit dem Schwerpunkt „Depletion of raw materials and natural resources“ (Ausgabe 6/2014)
  - b. Darstellung der Ergebnisse hinsichtlich der Windenergie auf dem neuen web-Portal [www.windenergie.ressource-deutschland.de](http://www.windenergie.ressource-deutschland.de) von VDI-ZRE
  - c. Special Report „Rohstoffe für den Ausbau erneuerbarer Energien" im Windenergie Report Deutschland 2014 des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), erscheint im Frühjahr 2015
- Mit weiteren Anfragen ist im Verlauf des Jahres 2015 zu rechnen.

Dr. Peter Viebahn  
– Projektleiter –  
31. Dezember 2014

Anlagen:

- Erfolgskontrollbericht
- „Kurzfassung“ (Berichtsblatt)

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ---	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Viebahn, Peter; Arnold, Karin; Friege, Jonas; Krüger, Christine; Nebel, Arjuna; Samadi, Sascha; Soukup, Ole; Ritthoff, Michael; Teubler, Jens; Wiesen, Klaus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2014	
	6. Veröffentlichungsdatum 30.05.2014	
	7. Form der Publikation Abschlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 103147	
	10. Förderkennzeichen 032532	
	11. Seitenzahl 277	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 220	
	14. Tabellen 97	
	15. Abbildungen 95	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) BMUB, Hr. Dr. Pieplow, Referat WA III.1, Berlin, 06.06.14 (das Projekt wurde für das BMU durchgeführt) PTJ für BMWi, Geschäftsbereich EEN, Jülich, 06.06.14		

## 18. Kurzfassung

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 den Stromverbrauch, soll hier der Anteil aus erneuerbaren Energien bis 2050 auf 80 % steigen. Für 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). 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, wurde 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.

Die vorliegende Studie versucht, die bisherige Bewertungslücke zu schließen und damit einen Beitrag zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse erneuerbarer Energien zu leisten. Ziel war es, Hinweise darauf zu geben, ob und wie sich eine Energiewende mit hohem Ausbau erneuerbarer Energien ressourceneffizienter gestalten lässt. Untersucht wurde, 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.

### 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 Seltenerdmetalle, 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 Windenergie, 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.

#### 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.

### 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.

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 und auf solche zur Verlängerung von Nutzungs- und Lebensdauer zu legen.

### 19. Schlagwörter

---

### 20. Verlag

---

### 21. Preis

---