



SPECIALISTS IN
EMPIRICAL ECONOMIC
RESEARCH



GWS RESEARCH REPORT 2018/8

Mögliche Engpässe für die Energiewende

Christian Lutz, Lisa Becker, Ulrike Lehr (GWS)

Impressum

KONTAKT

Dr. Christian Lutz

Tel: +49 (541) 40933-120, E-Mail: lutz@gws-os.com

Lisa Becker

Tel: +49 (541) 40933-287, E-Mail: becker@gws-os.com

Dr. Ulrike Lehr

Tel: +49 (541) 40933-280, E-Mail: lehr@gws-os.com

TITEL

Mögliche Engpässe für die Energiewende

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, Oktober 2018

HINWEIS

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojekts 21/15 „Makroökonomische Wirkungen und Verteilungsfragen der Energiewende“ im Auftrag des BMWi erarbeitet.

HERAUSGEBER

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

Tel.: 0541 40933-100

Fax: 0541 40933-110

Internet: www.gws-os.com

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Engpässe bei der Produktion von EW-Gütern	3
2.1 Hintergründe	3
2.2 Engpässe	5
2.2.1 Finanzierung	5
2.2.2 Qualifizierte Arbeitskräfte	7
2.2.3 Knappe Rohstoffe, Vorprodukte oder Flächen für die Herstellung von Energiewendegütern	9
2.2.4 Entsorgung	11
3 Übergreifende Begrenzungen der Energiewende	12
3.1 Rebound-Effekte	12
3.2 Pfadabhängigkeiten / Lock-in-Effekte	14
4 Fazit und Ausblick	17
Literaturverzeichnis	20

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Mögliche Engpässe bei der Produktion von Energiewendegütern	5
Abbildung 2: Offene Stellen und Arbeitslose in den Ingenieurberufen im 1. Quartal 2018	8
Abbildung 3: Wirkung des Rebound-Effektes	14

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Auslastung der industriellen Produktionskapazitäten im zweiten Quartal 2018 in Europa	4
Tabelle 2:	Gründe für Produktion unterhalb der Kapazitätsgrenze	5
Tabelle 3:	Projektion des Arbeitskräfteengpasses im Berufsfeld „Bauberufe, Holz-, Kunststoffbe- und -verarbeitung“ für das Jahr 2035	9
Tabelle 4:	Mineralische Rohstoffe mit hoher Marktkonzentration	10
Tabelle 5:	Einschätzung der Engpässe der Energiewende	18

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
BBPIG	Bundesbedarfsplangesetz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
EC	Europäische Kommission
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnLAG	Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen
EU	Europäische Union
EW	Energiewende
FuE	Forschung und Entwicklung
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung
HBCD	Hexabromcyclododecan
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
IEA	International Energy Agency
IW	Institut der deutschen Wirtschaft Köln
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LED	Lichtemittierende Diode
NGO	Nichtregierungsorganisation
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PIR	Polyisocyanurat
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZEW	Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung

1 EINLEITUNG

Mit der Energiewende (EW) verfolgt Deutschland den langfristigen Umbau des Energiesystems. Der Ausbau erneuerbarer Energien und die Steigerung der Energieeffizienz sind die dabei verfolgten Kernziele. Die Energiewende wirkt gesamtwirtschaftlich positiv (Lutz et al. 2018). Allerdings stellt sich vor dem Hintergrund der sehr robusten gesamtwirtschaftlichen Entwicklung in den letzten Jahre zunehmend die Frage, ob Engpässe und Restriktionen den Erfolg der Energiewende derzeit oder zukünftig teilweise konterkarieren können. Investitionen in die Energiewende sind wichtig, um die Ziele der Energiewende zu erreichen. Im Folgenden wird auf Basis einer Literaturrecherche für Deutschland untersucht, welche gesamtwirtschaftlichen und sozio-ökonomischen Zusammenhänge hierbei zu beachten sind. Im Kern sind zwei mögliche Wirkungsmechanismen zu betrachten, die die Energiewende betreffen:

1. Notwendige, geplante Investitionen können wegen Input-Knappheiten, Restriktionen bei der Umsetzung oder aufgrund von Effekten der Energiewende nicht ausreichend umgesetzt werden (Abschnitt 2).
2. EW-Investitionen unterbleiben und genehmigte oder durchgeführte EW-Investitionen können nicht vollendet werden oder wirken nicht so wie beabsichtigt aufgrund von Systemträgheiten technologischer und verhaltensabhängiger Art (Abschnitt 3).

Engpässe oder Bottlenecks haben keine einheitliche oder quantitative Definition. Sie verlangsamen grundsätzlich den andernfalls reibungslosen möglichen Fluss von Waren, wie bei Engpässen in der Abfertigung, im Transportwesen oder in der Infrastruktur:

- Bei Geldströmen sind hierzu finanzielle Engpässe oder Grenzen und Hürden im Zugang zu Geldmitteln, Krediten oder Zwischenfinanzierungen aufzuführen.
- Engpässe können bei der Produktion auftreten, wenn wichtige Inputs wie Arbeitskräfte, Energie, Material oder Vorleistungsgüter nicht in hinreichender Menge zur Verfügung stehen oder Planungskapazitäten und Genehmigungen fehlen.

Die Gründe können makroökonomischer Natur sein, aber auch strukturelle Ursachen haben wie bspw. Regulierung, etwa in Form fehlender Betriebsgenehmigungen.

Von der Energiewende etwa in Form höherer Strompreise gehen ebenfalls möglicherweise begrenzende Wirkungen auf die Produktion anderer stromintensiver Güter aus, die hier nicht weiter betrachtet werden. Durch verschiedene Ausnahmeregelungen sowohl auf EU-Ebene als auch auf Bundesebene wie die besondere Ausgleichsregelung beim EEG bleiben diese Effekte bisher und auf absehbare Zeit aber gering. In der Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Energiewende (Lutz et al. 2018) sind entsprechende Wirkungen enthalten.

Auf makroökonomischer Ebene werden Engpässe und Restriktionen beschrieben (EC 2010), die nach der Wirtschafts- und Finanzkrise die Rückkehr der Mitgliedstaaten auf einen entsprechenden Wachstumspfad erheblich gemindert haben. Dies sind vor allem Überlegungen zu den klassischen Wachstumsgrößen wie den Rahmenbedingungen für

die öffentlichen Haushalte, Geldpolitik und Handelsbilanzüberschüsse oder -defizite sowie zur Situation auf dem Arbeitsmarkt, zur Investitionstätigkeit und zur Produktivität.

Im Jahr 2018 sieht sich Deutschland teils anderen Herausforderungen gegenüber als nach der Finanzkrise im Jahr 2008. Kapazitätsgrenzen werden diskutiert, die die Produktion bremsen könnten. Qualifizierte Arbeitskräfte sind in verschiedenen Bereichen knapp und werden verstärkt umworben. Die Bundesregierung plant ein Einwanderungsgesetz, das u. a. den Zuzug von Arbeitskräften von außerhalb der EU regeln soll. Wohnungen sind vor allem in Ballungsräumen verstärkt gesucht und zunehmend teuer. Die Bundesregierung möchte deshalb u. a. zusätzlich 1,5 Mio. Neubauwohnungen bis 2021 schaffen. All dies sind Hinweise dafür, dass Engpässe verstärkt auftreten können und mit Blick auf die Energiewende genauer zu betrachten sind. Eine Untersuchung für die Europäische Kommission (EC 2017a) blickt auf diese Engpässe aus Sicht der Klima- und Energiepolitik und betrachtet sie auf dem Arbeitsmarkt, in der Produktion und im Bereich Finanzierung.

Investitionen in Energieeffizienz oder erneuerbare Energien könnten in einer solchen guten gesamtwirtschaftlichen Lage mit starker Kapazitätsauslastung und angesichts der ambitionierten energie- und klimapolitischen Ziele (teilweise) Investitionen in anderen Wirtschaftssektoren verdrängen, d. h., sie unterbleiben dort, wären aber möglicherweise ohne die Energiewende-Investitionen getätigt worden. Durch diese Verdrängung, das sog. Crowding out, könnten die unmittelbaren positiven Impulse durch Investitionen in Energieeffizienz oder erneuerbare Energien auf die gesamtwirtschaftliche Nachfrage reduziert werden, falls die Energiewendeinvestitionen weniger produktiv sind als die verdrängten Investitionen. Als Engpass für die Energiewende kann sich in umgekehrter Richtung die hohe Kapazitätsauslastung erweisen, wenn Investitionen in die Energiewende unterbleiben oder nur noch mit höheren Kosten etwa in Form höherer Fördergelder erreichbar sind. Diese Wirkungsrichtung wird im Folgenden betrachtet.

Neben den Engpässen bei der Produktion von Energiewendegütern gibt es auch Restriktionen, die in der Energiewende selbst und dem dazu notwendigen Transformationsprozess begründet sind. Dies sind zum einen Pfadabhängigkeiten der Infrastrukturen und Energiewendegüter, die dazu führen, dass bisherige Technologien lange im Einsatz sind und Investitionen in EW-Güter gebremst werden. Zum anderen handelt es sich um Verhaltensweisen, die die Wirksamkeit der Energiewende begrenzen, wie etwa der Rebound-Effekt, durch den der Energieverbrauch weniger stark zurückgeht als gedacht. Diese Restriktionen sind vergleichbar mit dem Luftwiderstand in der Mechanik.

Ziel dieses Teils des Beitrags ist es vor allem zu zeigen, dass die Energiewende nicht im luftleeren Raum sondern vor dem Hintergrund allgemeiner wirtschaftlicher Engpässe und Wachstumschancen stattfindet. Dazu werden nach einer Definition mögliche Engpässe bei der Produktion der EW-Güter aufgezeigt (Abschnitt 2). Anschließend werden in Abschnitt 3 übergreifende Restriktionen für die Energiewende dargestellt. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und einem Ausblick auf die Bereiche, in denen eine tiefergehende Analyse und verstärkte Berücksichtigung bei der Gestaltung der Energiewende wünschenswert wären.

2 ENGPÄSSE BEI DER PRODUKTION VON EW-GÜTERN

2.1 HINTERGRÜNDE

In einer Marktwirtschaft regelt der Preismechanismus grundsätzlich den Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Im Gegensatz zu Planwirtschaften besteht damit ein System, das den Marktteilnehmern Knappheiten signalisiert und Engpässen entgegenwirkt. Allerdings bedeutet dies nicht, dass keine Engpässe über längere Zeiträume auftreten können. Auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene gibt es Phasen langfristiger Unterauslastung des Produktionsapparats, zuletzt während der Wirtschafts- und Finanzkrise ab 2008, wie auch Phasen der Hochkonjunktur, in denen Produktionsfaktoren knapp sind, etwa qualifizierte Arbeitskräfte fehlen.

Von der EU-Kommission wurde in EC (2010) vor dem Hintergrund der Wirtschafts- und Finanzkrise eine Einschätzung der wichtigsten Engpässe für die Mitgliedstaaten gegeben. Für Deutschland wird eine Stärkung der Nachfrage sowie des langfristigen Wachstumspotenzials etwa durch bessere Ausschöpfung des Arbeitskräftepotenzials und verstärkte Anstrengungen in den Bereichen Bildung, Forschung und Entwicklung und Erneuerung des Kapitalstocks empfohlen.

Kapazitätsgrenzen und -beschränkungen sind vor allem in einer stark ausgelasteten Volkswirtschaft wie aktuell in Deutschland zu erwarten. In einer idealtypischen geschlossenen Volkswirtschaft mit funktionierenden Märkten, in der alle Produktionsfaktoren bereits optimal eingesetzt sind und Vollbeschäftigung herrscht, sind zusätzliche Investitionen kurzfristig gar nicht möglich. Über höhere Preise bzw. höhere Zinssätze würden die Investitionen in die Energiewende andere Investitionen vollständig verdrängen und umgekehrt könnten Investitionen in anderen Bereichen die Weiterentwicklung der EW erschweren. Anders verläuft der Effekt in einer (stark) unterbeschäftigten Volkswirtschaft, in der vorhandene Kapazitäten zur Produktion weiterer Güter bereitstehen. Die Höhe des möglichen „Crowding out“ in einer Volkswirtschaft hängt deshalb auch von der konjunkturellen Lage ab: Je höher die Auslastung des Produktionspotenzials in der Volkswirtschaft oder einer Branche wie der Bauwirtschaft und je höher die Zinssätze sind, desto stärker treten Effekte des Crowding out auf (Lutz & Breitschopf 2016).

Wie groß ist aktuell die Gefahr solcher Engpässe in einer offenen Volkswirtschaft wie Deutschland? Die europäischen Länder beispielsweise produzieren im Jahr 2018 bei um die 84 % ihrer Kapazitäten (siehe Tabelle 1). Deutschland liegt mit 87,8% deutlich über dem EU-Durchschnitt und nur knapp hinter Österreich (88,5 %) und Schweden (88,0 %) an dritter Stelle.

Für Deutschland weist die Herbstprojektion der Bundesregierung (BMF & BMWi 2018) eine Produktionslücke von 17,6 Mrd. Euro aus, die im langjährigen Vergleich nicht hervorsteht. Die gesamtwirtschaftliche Lage ist somit gut, Hinweise für starke Engpässe auf gesamtwirtschaftlicher Ebene liefert die Zahl aber nicht. In den einzelnen Branchen fällt der Auslastungsgrad durchaus unterschiedlich aus (Wohlrabe, Wollmershäuser, 2018). Insgesamt liegt der Auslastungsgrad mit etwa 3 Prozentpunkten über dem langfristigen Mittelwert aktuell am oberen Rand der langfristigen Entwicklung. Im Dienstleistungssektor liegt die ifo-Kapazitätsauslastung bei etwa 90 %, im Bauhauptgewerbe ist mit 80 %

offensichtlich noch Luft nach oben.

Tabelle 1: Auslastung der industriellen Produktionskapazitäten im zweiten Quartal 2018 in Europa

Region	Auslastung	Region	Auslastung
Euro Region	84,2 %	Luxemburg	81,8 %
EU28	83,8 %	Malta	77,5 %
Belgien	80,9 %	Niederlande	83,6 %
Bulgarien	75,2 %	Österreich	88,5 %
Dänemark	81,0 %	Polen	82,8 %
Deutschland	87,8 %	Portugal	80,6 %
Estland	73,2 %	Rumänien	74,1 %
Finnland	84,9 %	Schweden	88,0 %
Frankreich	85,9 %	Slowakei	85,4 %
Griechenland	71,5 %	Slowenien	86,3 %
Irland	n/a	Spanien	80,2 %
Italien	77,5 %	Tschechische Republik	85,4 %
Kroatien	73,2 %	Ungarn	84,2 %
Lettland	76,0 %	Vereinigtes Königreich	82,9 %
Litauen	77,4 %	Zypern	61,3 %

Quelle: Eurostat (2018).

Gründe für ungenutzte Produktionskapazitäten sind auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, wie eine Befragung für die EU-Kommission in Tabelle 2 zeigt: Angefangen von zu wenig Nachfrage über Wetterbedingungen bis hin zu den bereits genannten Engpässen auf dem Arbeitsmarkt. Zulieferknappheiten scheinen nur für einen geringen Anteil an den Produktionsknappheiten verantwortlich gemacht zu werden. Bei der Finanzierung sieht es da bereits anders aus, denn immerhin 14,3 % der Befragten nennen Finanzierungsengpässe. Die Europäische Kommission (EC 2017a) fragt weiterhin, ob Unternehmen überhaupt jemals mit einer 100%igen Auslastung arbeiten. Die Datenlage legt eher nahe, dass nie alle Unternehmen gleichzeitig Vollauslastung erreichen. Auch einzelne Unternehmen dürften eher eine Auslastung zwischen 80 und 90 % für normal erachten und bei Über- oder Unterschreitung versuchen, geeignete Maßnahmen zu ergreifen – bei Überschreitung sind dies vor allem Erweiterungsinvestitionen – beziehungsweise auf politische Maßnahmen etwa in Form besserer Bildungsangebote oder eines verstärkten Fachkräftezuzugs aus dem Ausland zur Beseitigung eines Engpasses zu setzen.

Tabelle 2: Gründe für Produktion unterhalb der Kapazitätsgrenze

Engpass	Anteil der betroffenen Unternehmen
Kein spezieller	36,1 %
Zu wenig Nachfrage	30,6 %
Wetterbedingungen	20,2 %
Knappheit bei Arbeitskräften	10,8 %
Knappheit bei Material oder Ausrüstungen	1,1 %
Andere	11,5 %
Finanzierungsengpässe	14,3 %

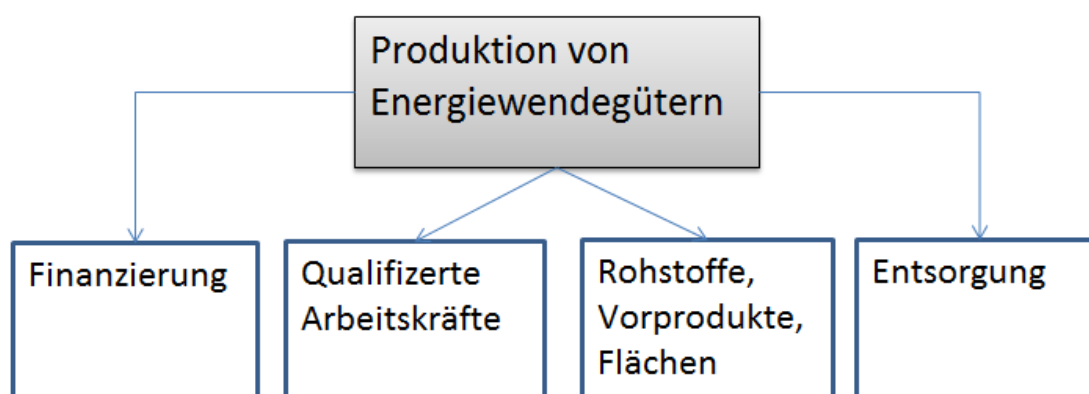
Quelle: EC 2017a.

Einige der Gründe für Produktion unterhalb der Kapazitätsgrenze zeigen sich nach dem KfW-Kommunalpanel auch für Deutschland. Dazu kommt ein ausgeprägter Investitionsrückstand auf der kommunalen Ebene (KfW 2018), der in den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 genauer ausgeführt wird.

2.2 ENGPÄSSE

Für die Umsetzung der Energiewende werden Güter wie Windräder, effiziente Maschinen oder E-Autos benötigt. Die Herstellung und der Betrieb dieser Güter können von Engpässen betroffen sein. Der von den in EC (2017a) befragten Unternehmen nach fehlender Nachfrage und Wetterbedingungen am häufigsten benannte Engpass ist der Finanzierungsengpass. Auch fehlende Rohstoffe, Vorprodukte oder Flächen, ein Mangel an qualifizierten Arbeitskräften, fehlende Planungskapazitäten und Genehmigungen oder die Entsorgung stellen mögliche wichtige Engpässe dar (vgl. Abbildung 1). Im Folgenden werden diese Engpässe mit Blick auf die Energiewende genauer betrachtet.

Abbildung 1: Mögliche Engpässe bei der Produktion von Energiewendegütern



Quelle: Eigene Darstellung.

2.2.1 FINANZIERUNG

Engpässe bei der Finanzierung von Energiewendegütern können einerseits angebotsseitig auftreten, wenn Unternehmen finanzielle Mittel fehlen, um ein neues Energiewendegut herzustellen. Nachfrageseitig können z. B. Kommunen oder private Haushalte bei

fehlendem Finanzierungsspielraum nicht in energieeffiziente Güter investieren. Unternehmen mit finanziellen Rücklagen oder guter Bonität sind hier im Vorteil. Auch Kommunen und Haushalte müssen in der Regel einen Eigenanteil finanzieren, was Akteure mit höherem finanziellem Spielraum bevorzugt. Passende staatliche Förderprogramme und Finanzierungsinstrumente können die Engpässe reduzieren.

Aus Sicht der Unternehmen, aber auch der Kommunen und der Haushalte stehen die Zugänge zu geeigneten Krediten mit attraktiven Laufzeiten, Zinsen und weiteren Konditionen oftmals nicht in ausreichender Menge zur Verfügung. Wenngleich viele Energieinvestitionen volkswirtschaftlich sinnvoll und langfristig auch für den Investor wirtschaftlich sind, fehlen die notwendigen Mittel zur Anfangsinvestition oder sie werden nicht bereitgestellt. Verschiedentlich stellt sich bei der Evaluierung von öffentlichen Förderprogrammen etwa der KfW oder beim Umweltbonus zur Förderung der Elektromobilität heraus, dass längst nicht alle Mittel abgerufen worden sind. Hier fehlt es teilweise an den notwendigen Informationen selbst oder an den Kanälen, auf denen diese Informationen verbreitet werden können, um die Zielgruppen zu erreichen. Vielfach fehlt es an qualifizierten Mitarbeitern zur Beantragung von Fördermitteln oder zur Planung der Vorhaben selbst (DIW 2017, KfW 2018, vgl. Abschnitt 2.2.2).

Bei den finanziellen Engpässen gibt es unterschiedliche theoriegestützte Ansichten, in welchem Umfang die Restriktionen tatsächlich auftreten. In der neoklassischen Wirtschaftstheorie ist die verfügbare Geldmenge begrenzt, sodass unter dieser Annahme Investitionen in EW-Güter kurzfristig nur dann möglich sind, wenn die Geldanlage in andere Bereiche eingeschränkt wird (EC 2018). Umgekehrt würden hohe Gesamtinvestitionen weitere Investitionen in die EW begrenzen. Somit besteht ein Engpass in der Finanzierung in Form eines Zielkonflikts.

Aber auch unter der Annahme einer endogenen Geldmenge, bei der Investitionen grundsätzlich nicht auf eine festgelegte Menge limitiert sind, können Engpässe auftreten (EC 2018). Beispielsweise stehen hierbei Investitionen in erneuerbare Energien in Konkurrenz zu Investitionen in fossile Energien, dies aber nicht in jedem Fall, weil etwa nicht genügend Geld für beide Technologiearten zur Verfügung steht, sondern teilweise auch weil Investoren/-innen sich an der Struktur und langfristigen Ausrichtung des Energiesystems orientieren (EC 2017a). So können hier finanzielle Engpässe auftreten, die durch die (Risiko-) Eigenschaften des Investitionsprojektes (z. B. Risiken der Technologien), die Kapitalkosten der Investition (z. B. für die Beschaffung von Fremdkapital) sowie den Verschuldungsgrad der Investoren/-innen bestimmt werden (EC 2017b).

Wachsende Investitionsrückstände der Kommunen sind teilweise ein Zeichen für fehlende Finanzierungsmöglichkeiten. Nach dem Kommunalpanel der KfW (2018) ist dies in prosperierenden Regionen eher ein Zeichen ökonomischer Stärke, in Regionen mit schrumpfender Bevölkerungszahl und/oder schwieriger Haushaltslage der Kommunen ein Zeichen fehlender Investitionsfähigkeit. In vielen Fällen mangelt es in den Kommunen an qualifiziertem Personal, das grundsätzlich verfügbare Bundes- und Landesmittel überhaupt einwerben und damit in Projekte umsetzen kann. Kapazitätsengpässe in der Bauwirtschaft und steigende Preise tragen zu einem wachsenden Investitionsrückstand bei (DIW 2017, KfW 2018). Ausbleibende Infrastrukturinvestitionen im kommunalen Be-

reich stellen einen Engpass für die Energiewende dar, denn gerade im öffentlichen Gebäudebereich sind die Auswirkungen der Gebäudesanierung nicht zu unterschätzen. Zum einen entlasten die eingesparten Energieausgaben die öffentlichen Haushalte, zum anderen erfüllen diese Gebäude immer eine Vorbild- oder Schaufensterfunktion für Investitionen im privaten Bereich.

2.2.2 QUALIFIZIERTE ARBEITSKRÄFTE

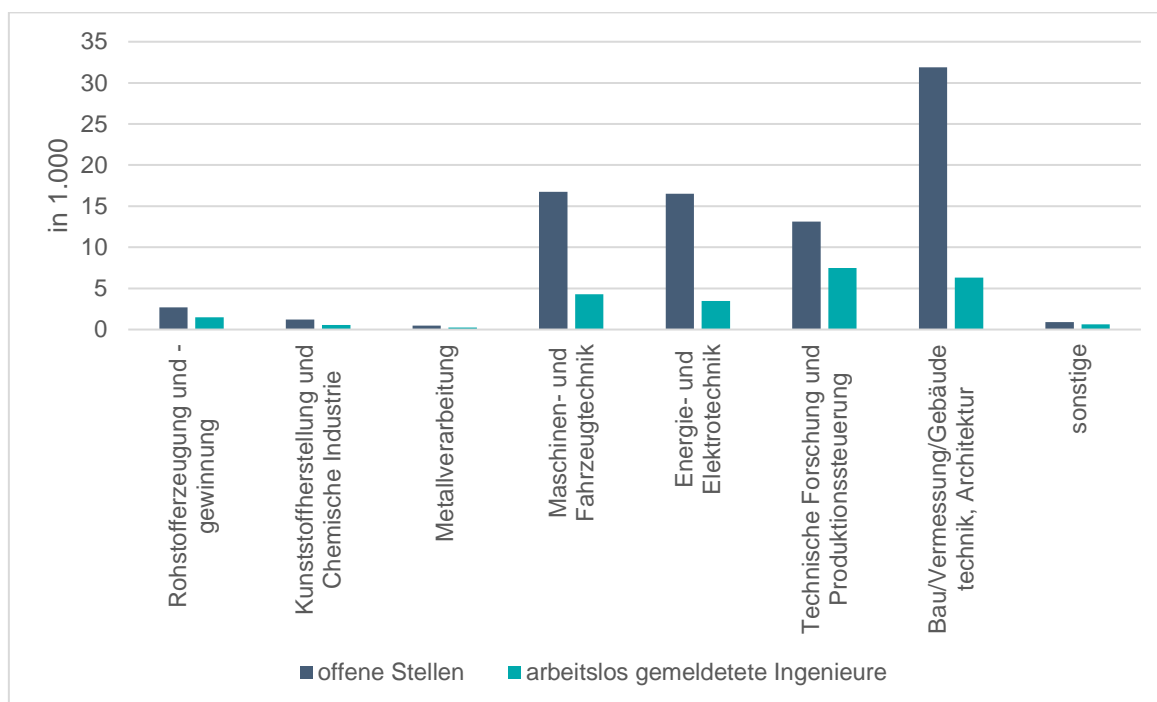
Die Arbeitskräfteverfügbarkeit wird als einer der großen wirtschaftlichen Engpässe der Zukunft wahrgenommen. Doch welche Auswirkungen lassen sich bereits heute beobachten? Und welche Auswirkungen entstehen konkret für die Energiewende?

Die Bundesagentur für Arbeit veröffentlicht regelmäßig Informationen zu den Engpässen auf dem Arbeitsmarkt. Aktuell besteht für verschiedene Berufsgruppen ein Fachkräftemangel, neben sozialen Berufen sind insbesondere technische und Bauberufe betroffen. Die Bundesagentur für Arbeit (2018) unterscheidet hierbei zwischen „Fachkräftemangel“ und „Anzeichen für einen Engpass“. Die Energiewende ist hiervon sowohl direkt betroffen, wie beispielsweise von Engpässen im Bau oder konkret bei Klempnern/-innen, als auch vielfach indirekt etwa bei öffentlichen Planern/-innen und Architekten/-innen. Technische Berufe wie im Ingenieurwesen oder Elektronikbereich sind für neue Energiewendegüter wie Anlagen, Motoren oder Haushaltsgeräte von großer Bedeutung.

Für Arbeitskräfte mit geringem Anforderungsprofil in der Energietechnik ergibt sich z. B. ein bundesweiter Mangel, 100 offenen Stellen in diesem Bereich stehen nur 56 arbeitslose Fachkräfte gegenüber. In den Bauberufen bewirkt die derzeitige Hochkonjunktur eine stärkere Nachfrage nach Fachkräften, es zeigt sich allerdings eine uneinheitliche Verteilung: Je nach Berufszweig, Anforderungsniveau und Region ist der Fachkräftemangel unterschiedlich stark ausgeprägt, in einigen Bundesländern liegen keine Engpässe oder lediglich Anzeichen hierfür vor. In der Engpassanalyse der Bundesagentur für Arbeit (2018) zeigt sich, dass die Vakanzzeit, also der Zeitraum nach Ausschreibung einer Stelle bis zu ihrer Besetzung, in vielen Wirtschaftszweigen gestiegen ist. Die am stärksten betroffenen Berufe, die einen engen Energiewende-Bezug aufweisen, sind Klempner/-innen, Energietechniker/-innen und IT-Fachleute. Bauberufe weisen inzwischen eine Vakanzzeit von 141 Tagen auf. Dieser Wert ist gegenüber dem Vorjahr 2017 um 31 Tage gestiegen.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Engpässe in den Ingenieurberufen in Deutschland. Die EW-relevanten Berufsfelder „Energie- und Elektrotechnik“ sowie „Bau / Vermessung / Gebäudetechnik, Architektur“ gehören zu den Ingenieurberufen, bei denen der Bedarf am deutlichsten das Arbeitskräfteangebot übersteigt. Dabei verteilt sich der Engpass regional unterschiedlich: In der Energie- und Elektrotechnik z. B. reicht die Spanne von 146 offenen Stellen pro 100 Arbeitslosen in Berlin/Brandenburg bis 865 offenen Stellen pro 100 Arbeitslosen in Baden-Württemberg (VDI & IW 2018).

Abbildung 2: Offene Stellen und Arbeitslose in den Ingenieurberufen im 1. Quartal 2018



Quelle: VDI & IW 2018, eigene Darstellung

Die Energiewende fordert Kompetenzen, die teilweise nicht durch die Inhalte der bestehenden Ausbildungen abgedeckt werden. Ein Angebot von EW-spezifischen Ausbildungsberufen, die sich am Produkt orientieren, wie z. B. „Mechatroniker für Windkraftanlagen“, hätte jedoch zur Folge, dass die berufliche Mobilität der Auszubildenden eingeschränkt wird und dadurch die Attraktivität des Ausbildungsberufs sinkt. Räß (2014) schlägt daher die Beibehaltung der technologieorientierten Ausbildungsstrukturen vor, um die Flexibilität der Arbeitskräfte zu gewährleisten und Risiken einer zu starken Anbindung an die EW-Technologie zu vermeiden. Weiterbildungsmaßnahmen können die „klassischen“ Ausbildungen zur Vermittlung der EW-spezifischen Fähigkeiten ergänzen.

Bei der Frage nach dem Bedarf an Arbeitskräften für die Umsetzung der EW muss beachtet werden, dass auch indirekte Effekte auf die Beschäftigung wirken: So steigen durch die Energiewende die Vorleistungen an, die zur Produktion der EW-Güter und zur Erbringung der EW-Dienstleistungen benötigt werden. Diese Bruttobeschäftigung der EW ist durch einen hohen Anteil an Arbeitskräften mit einer Berufsausbildung (82,1 %) und/oder einen Hochschulabschluss (32,1 %) gekennzeichnet, nur 4,1 % der Beschäftigten in der EE-Branche waren im Jahr 2007 ungelernt (Lehr 2014). Der branchenübergreifende Anteil ungelernter Personen am Arbeitsmarkt liegt bei etwa 12 % (Bundesagentur für Arbeit 2016).

Auch für die Zukunft werden Engpässe in den für die Energiewende relevanten Berufsfeldern projiziert: In den Bauberufen werden einer BIBB-Projektion zufolge 80.900 Erwerbstätige im Jahr 2035 fehlen (BIBB 2018a). Tabelle 3 zeigt die regional unterschiedliche Verteilung des erwarteten Unterangebots. In Relation zum Bedarf wird der erwartete Engpass insbesondere in Bayern, in der Region Nord und in Nordrhein-Westfalen erheblich sein.

Tabelle 3: Projektion des Arbeitskräfteengpasses im Berufsfeld „Bauberufe, Holz-, Kunststoffbe- und -verarbeitung“ für das Jahr 2035

	Bedarf	Angebot	Differenz
Deutschland	1.252.100	1.171.200	-80.900
Region Nord (Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen, Niedersachsen)	194.800	173.600	-21.200
Nordrhein-Westfalen	254.000	229.600	-24.400
Region Mitte-West (Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland)	164.700	163.300	-1.400
Baden-Württemberg	168.400	165.900	-2.500
Bayern	223.200	196.300	-26.900
Region Ost (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Berlin)	247.000	242.500	-4.500

Quelle: BIBB 2018b

Prognos (2015) sieht ebenfalls eine Verschärfung der Engpasssituation in vielen Fachrichtungen, darunter im Bereich „Elektrizität, Energie, Elektrotechnik“ und im Baugewerbe: Für das Jahr 2040 liegt demnach das Arbeitskräfteangebot in diesen Bereichen 10,1 % bzw. 9,0 % unter der Arbeitskräftenachfrage.

2.2.3 KNAPPE ROHSTOFFE, VORPRODUKTE ODER FLÄCHEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON ENERGIEWENDEGÜTERN

Auf dem Gütermarkt können Engpässe bei der Produktion von EW-Gütern auftreten. Insbesondere die Verfügbarkeit von Rohstoffen spielt hierbei eine maßgebliche Rolle: Bei einer Knappheit der eingesetzten Materialien steigen die Preise, sodass die EW-Güter teurer werden können (Lehr et al. 2016).

Für den Bau von EE-Anlagen werden nicht nur spezielle Ressourcen wie Seltene Erden benötigt, sondern vor allem auch Metalle wie Aluminium, Kupfer und Eisen eingesetzt (siehe z. B. Bau von Windkraftanlagen, DERA 2016). Die Hersteller von Energiewendegütern konkurrieren dabei mit anderen Wirtschaftszweigen, wie dem Fahrzeugbau, dem Maschinenbau oder der Bauindustrie um diese Materialien und tragen zur steigenden Knappheit auf den Rohstoffmärkten bei (acatech, Leopoldina & Akademienunion 2017a).

Auf der Angebotsseite besteht für einige für den Bau von EW-Gütern wie Batterien für die E-Mobilität, Windräder oder PV-Module relevante Rohstoffe wie Seltene Erden, Gallium, Silizium, Vanadium oder Indium besteht eine hohe Marktkonzentration Als Maß hierfür dient der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI), der sich aus der Summe der quadrierten Marktanteile der auf einem Markt agierenden Unternehmen berechnet. Beispielsweise ergibt sich für ein Duopol, in dem der Marktanteil von Unternehmen 1 bei 70 % und von Unternehmen 2 bei 30 % liegt, ein HHI in Höhe von 5.800 ($= 70^2 + 30^2$). Märkte mit einem HHI zwischen 1.500 und 2.500 gelten als mäßig konzentriert, ein Wert über 2.500 kennzeichnet einen hoch konzentrierten Markt (BGR 2016). Das größte Produktionsland ist bei den in Tabelle 4 dargestellten Rohstoffen stets China, das in der

Vergangenheit den Export einiger Rohstoffe beschränkt hat. Der Abbau der mineralischen Rohstoffe findet häufig auch in politisch und wirtschaftlich instabilen Ländern statt, sodass das Angebot von der aktuellen Situation in den Förderländern abhängt und somit eingeschränkt sein kann (BGR 2016).

Tabelle 4: Mineralische Rohstoffe mit hoher Marktkonzentration

	HHI
Seltene Erden	8.359
Gallium	6.275
Silizium	4.306
Vanadium	3.969
Indium	3.314

Quelle: BGR 2016

Für weitere Rohstoffe werden global stark wachsende Nachfragemengen erwartet. Für die Herstellung von Batterien werden zukünftig u. a. große Mengen von Lithium und Kobalt benötigt. Bei Lithium wird das Angebot aktuell von Chile und Argentinien bestimmt. Bis zum Jahr 2025 wird erwartet, dass Australien, Argentinien und Kanada Produktion und Anteile ausweiten können. Ob es in Bolivien, dem Land mit den größten Reserven, gelingen wird, zukünftig eine funktionierende Förderung zu etablieren, ist offen (DERA 2017). NGOs weisen daneben auf die Schwierigkeiten bei der Einhaltung von Sozialstandards hin (Misereor 2018). Kobalt wird derzeit z. B. zur Hälfte im Kongo gefördert, in dem ein Bürgerkrieg stattfindet. Kinderarbeit ist bei der Erzgewinnung an der Tagesordnung (BGR 2017). Bei einem Verbot oder einem freiwilligen Verzicht von Herstellern auf entsprechend geförderte Produkte könnten sich die Knappheiten zusätzlich erhöhen. Eine Schätzung der Bedarfe für 2035 zeigt, dass für fünf Rohstoffe, darunter Kobalt und leichte seltene Erden, etwa die Menge an heutiger Produktion benötigt wird, für weitere drei Rohstoffe wie Lithium und schwere seltene Erden liegt der Bedarf sogar mehr als doppelt so hoch (DERA 2016a).

Insbesondere im Verkehrsbereich kann der global schnelle Umstieg auf Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben zu einem Engpass bei Rohstoffen führen: Der Bedarf an Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit und Platin für den Einsatz in der Elektromobilität wird in Zukunft stark steigen (Öko-Institut 2017). In Szenarien bis 2025 zeigt sich z. B. für Lithium, dass die Primärproduktion durch Betriebserweiterungen und zusätzliche Projekte ausgeweitet werden muss, um die Nachfrage decken zu können (DERA 2017a).

Die Ausweitung der Förderung von Rohstoffen ist vielfach mit hohem Kapital- und Zeitbedarf verbunden. So wird für die Erschließung neuer Minen mit einem Zeitraum von mehreren Jahren gerechnet. Schwellen- und Entwicklungsländer in Afrika, Asien und Lateinamerika verfügen oft nicht über ausreichenden Zugang zu internationalen Kapitalmärkten. Das Beispiel der rückläufigen Erdölförderung in Venezuela (IEA 2018) zeigt, dass Misswirtschaft, Kriege oder politische Unruhen dazu führen können, dass vorhandene Ressourcen zumindest über längere Zeiträume nicht gefördert werden. Auch internationale Sanktionen gegenüber Rohstoffe anbietenden Ländern können in diese Richtung wirken.

Rohstoffgewinnung allein bedeutet noch nicht, dass die Produktion der Energiewendegüter uneingeschränkt möglich ist. Der Zugang zu Rohstoffen kann auch durch Marktmacht eingeschränkt werden, wie chinesische Exportbeschränkungen bei seltenen Erden in der Vergangenheit gezeigt haben (Pothen 2014). Schließlich ist Know-how für die Fertigung beispielsweise von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge notwendig. Wiederum besteht ein hoher Kapital- und Zeitbedarf, bis die Fertigung über alle Produktionsstufen großtechnisch läuft.

Eine Nachfragesenkung kann helfen, Engpässe im Rohstoffbereich zu vermeiden. Dabei spielt die Entwicklung alternativer Technologien eine besondere Rolle. Durch eine Erhöhung der Ressourceneffizienz oder Erforschung von Ersatzmaterialien kann der Bedarf gesenkt werden (Öko-Institut 2017). So kann beispielsweise dem Engpass an Metallen in der Elektroautomobilproduktion entgegengewirkt werden, indem Batterien mit einem geänderten Verhältnis an eingesetzten Rohstoffen entwickelt werden: Bei Nickel-Mangan-Kobalt-Batterien kann der Engpass an Kobalt entschärft werden, indem das Einsatzverhältnis der drei Rohstoffe von heute 1:1:1 zu 8:1:1 modifiziert wird (UBS 2017). Auch eine Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen durch Recycling kann zu einer Entspannung auf dem zukünftigen Rohstoffmarkt führen (Angerer et al. 2016).

Neben Rohstoffen können auch verarbeitete Vorprodukte, die als Vorleistungen in die Energiewendegüter eingehen, Auslöser für Engpässe sein. So traten beispielweise im Jahr 2017 Verzögerungen bei der Produktion von PUR- und PIR-Dämmstoffen für die Gebäudedämmung auf (Deutsche Handwerks Zeitung 2017a). Auf diese Weise kann der Erfolg der Energiewende durch Probleme beim Produktionsablauf zumindest zeitweise aufgehalten werden. Das Beispiel macht deutlich, dass die gesamte Wertschöpfungskette von Energiewendegütern für die Analyse von Engpässen zu betrachten ist.

Bei erneuerbaren Energien können sich Engpässe durch Flächenkonkurrenzen etwa bei der Windenergie ergeben. Bei der Biomasse besteht die Flächenproblematik in besonderem Maße, da für sie mehr Fläche benötigt wird, um die gleiche Energiemenge zu erhalten, als für Solar- und Windenergie, und alternativ Nahrungsmittel angebaut werden könnten (acatech, Leopoldina & Akademienunion 2017a). Auf diesen Punkt wird hier aber nicht weiter eingegangen.

2.2.4 ENTSORGUNG

Neben der Wertschöpfungskette kann auch die Lebenszyklus-Perspektive bei den Energiewendegütern eingenommen werden. Die heutige und zukünftige Entsorgbarkeit von Energiewendegütern könnte sich als Restriktion für die Energiewende erweisen. Das Flammschutzmittel HBCD, das früher in Dämmplatten aus Polystyrol eingesetzt wurde, bietet ein Beispiel für die Problematik von Entsorgungsengpässen, auch wenn dieses Problem mittlerweile gelöst ist. Aufgrund seiner schädlichen Eigenschaften wurde es als persistent organischer Schadstoff eingeordnet und seine Produktion und Verwendung im Jahr 2013 verboten (UBA 2013). Die Abfallverzeichnis-Verordnung stufte HBCD zunächst als gefährlichen Abfall ein, der nur in Müllverbrennungsanlagen mit entsprechender Genehmigung entsorgt werden darf. Durch die zu geringen Kapazitäten der Anlagen kam es zu einem Engpass bei der Entsorgung der alten Dämmplatten. Vor allem das Dachdeckerhandwerk war hiervon und den folglich hohen Preisen betroffen (Deutsche

Handwerks Zeitung 2017b). Seit dem 1. August 2017 ist dieser Engpass jedoch beseitigt, da die Verordnung geändert wurde und HBCD-haltige Stoffe somit auch wieder in anderen Anlagen verbrannt werden dürfen (BMU 2017).

Es müssen auch mögliche zukünftige Entsorgungsprobleme bedacht werden. Der Ausbau von PV-Anlagen führt zu erhöhten Entsorgungsmengen, wenn sie wegen Witterungsschäden oder einzelner defekter Teile ausgewechselt werden müssen. Die erwartete Lebensdauer beträgt etwa 25 Jahre. Voraussichtlich ab dem Jahr 2020 wird der Austausch der ersten Generation von PV-Anlagen anstehen. Bei der Entsorgung ist vor allem problematisch, dass viele PV-Module Blei und Cadmium enthalten, die als umwelt- und gesundheitsschädigende Stoffe einer besonderen Behandlung bedürfen (Deutsche Handwerks Zeitung 2018). Die Problematik wird an Relevanz gewinnen, da die Abfallmengen jährlich steigen werden: Die prognostizierte Menge wird von 0,014 bis 0,022 Mio. Tonnen im Jahr 2025 auf 4,9 bis 9,6 Mio. Tonnen im Jahr 2050 anwachsen (nach Beckmann 2012). Da bislang hierbei nur spezielle Unternehmen die Entsorgung übernehmen dürfen und das Recycling von Solarmodulen über zertifizierte Erstbehandlungsanlagen erfolgen muss (Deutsche Handwerks Zeitung 2018), können sich angesichts der steigenden Mengen in Zukunft Engpässe ergeben, weil sich die Entsorgung für Haushalte nicht lohnt und damit auch das Repowering stocken könnte. Weitreichender könnten die mittelbaren Folgen sein, wenn Investoren und Haushalte aus Angst oder Unsicherheit über zukünftige Entsorgungsprobleme Investitionen und Ausgaben in Energiewendegüter unterlassen oder zeitlich verschieben.

3 ÜBERGREIFENDE BEGRENZUNGEN DER ENERGIEWENDE

Über die Finanzierung und Produktion hinaus kann die Entwicklung der EW mit Barrieren konfrontiert sein, wenn EW-Investitionen unterbleiben, genehmigte oder durchgeführte EW-Investitionen nicht vollendet werden können oder nicht so wirken wie beabsichtigt. Gründe sind Systemträgheiten technologischer und verhaltensabhängiger Art. Im Folgenden werden dazu Rebound-Effekte und strukturelle Abhängigkeiten der EW in Form von Pfadabhängigkeiten beleuchtet. Wegen der langen Lebensdauer vieler Infrastruktureinrichtungen, Industrieanlagen, Fahrzeuge, Heizungen oder Haushaltsgeräte wird mit den Investitionsentscheidungen die künftige Entwicklung des Energieeinsatzes langfristig festgeschrieben. Dies wird als Lock-in-Effekt bezeichnet. Akzeptanzfragen der Bevölkerung beispielsweise können ebenfalls die EW hemmen, werden hier jedoch nicht näher betrachtet.

3.1 REBOUND-EFFEKTE

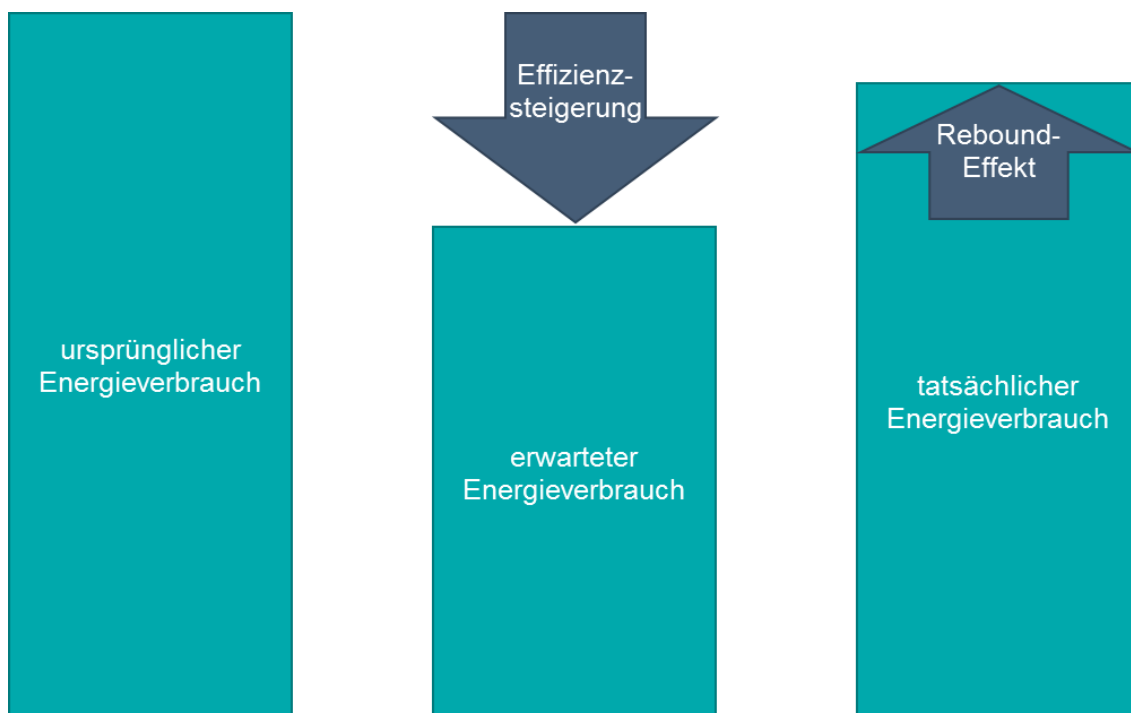
Eine zentrale Zielsetzung der EW ist die Steigerung der Energieeffizienz. Die Effizienzgewinne können jedoch durch Rebound-Effekte an Wirkung verlieren, d. h. dass die theoretisch berechnete technisch mögliche Einsparung durch den Konsumenten nicht verwirklicht wird (Madlener, Turner 2016). In der Literatur werden Rebound-Effekte je nach Definition von nahe null bis größer eins (das sogenannte Backfire) genannt

(Chakravarty, Dasgupta & Roy 2013). Nach einer Übersicht des UBA (2016) dürften die Effekte für Deutschland in einer Größenordnung von 10–30 % liegen. Abbildung 3 stellt den Effekt schematisch dar. Der Grund für dieses Defizit können verschiedene Arten von Zusammenhängen sein: Der direkte Rebound-Effekt betrifft die Nutzung des effizienteren Produktes selbst (UBA 2016). Durch den geringeren Energieverbrauch pro Anwendung wird das Produkt stärker nachgefragt, häufiger genutzt oder intensiver eingesetzt (UBA 2015), wodurch ein Teil der theoretischen Einsparung neutralisiert wird. Bei LEDs steigt die Zahl der Lichter im Vergleich zu Glühbirnen oder die Lampen leuchten länger. Bei einem direkten Rebound-Effekt von mehr als 100 %, dem sogenannten Backfire-Effekt, wird die durch den Effizienzgewinn eingesparte Energie durch die höhere Nutzung sogar überkompensiert (UBA 2015).

Beim indirekten Rebound-Effekt führen die geringeren Kosten des effizienteren Produktes dazu, dass mehr Einkommen zur Verfügung steht, das wiederum für einen höheren (Energie-)Konsum von anderen Produkten ausgegeben wird. Gerade energieintensive Konsumkategorien wie der Autokauf und -betrieb oder Flugreisen weisen eine hohe Einkommenselastizität der Nachfrage auf. Dies bedeutet, dass die Nachfrage nach diesen Gütern mit höherem Einkommen überproportional ansteigt. Dadurch wird der Effizienzgewinn an anderer Stelle teilweise kompensiert und die Energieeinsparungen fallen insgesamt geringer aus (UBA 2016).

Rebound-Effekte können schließlich auch als makroökonomische Rebounds auf gesamtwirtschaftlicher Ebene auftreten. Die sinkende Nachfrage nach Energie kann den Energieträgerpreis reduzieren und dadurch an anderer Stelle in der Volkswirtschaft (oder global) zu mehr Energieeinsatz führen. Somit kann die Nutzung des Energieträgers für andere Anwendungen angeregt werden, sodass der Verbrauch wieder zunimmt (Santarius 2012). Der Marktpreiseffekt hängt vom Verlauf der Angebots- und Nachfragefunktionen ab. Tendenziell ist der Effekt in der Industrie größer als bei Endnachfragern, weil bei ihnen die Preise mit mehr Abgaben und Fixkostenbestandteilen belastet sind und somit der Preiseffekt relativ geringer ausfällt.

Abbildung 3: Wirkung des Rebound-Effektes



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Madlener & Alcott 2011

Werden für die Umsetzung der Effizienzmaßnahmen Materialien benötigt, bei deren Herstellung Energie eingesetzt wird, entstehen sog. materielle Rebound-Effekte.

Die Ursache für Rebound-Effekte können neben den hier skizzierten ökonomischen bzw. finanziellen Gesichtspunkten auch andere sein: Bei psychologischen Rebound-Effekten verleiten die effizienteren Produkte zu einem höheren Verbrauch, da der/die Konsument/in aufgrund der umweltfreundlicheren Beschaffenheit des Produktes sein/ihr sparsames Verhalten aufhebt. Im Extremfall können geringe Einsparungen beim Stromverbrauch durch LED-Lampen dazu führen, dass Konsumenten verstärkt energieintensive Güter und Dienstleistungen nachfragen und damit insgesamt mehr Energie verbrauchen, weil sie durch die Effizienzmaßnahmen ihr „grünes“ Gewissen beruhigt haben. Von „Moral Licensing“ sprechen Dütschke et al. (2018) in diesem Zusammenhang.

All diese Verhaltensanpassungen bewirken, dass die durch die höhere Energieeffizienz eröffneten Minderungsmöglichkeiten nicht voll ausgeschöpft werden. Verschiedene Studien, die politische Handlungsmöglichkeiten zur Eindämmung von Rebound-Effekten untersuchen, plädieren vor allem für absolute Mengenbeschränkungen (Caps) oder Preisinstrumente wie Steuern (UBA 2016, van den Bergh 2011).

3.2 PFADABHÄNGIGKEITEN / LOCK-IN-EFFEKTE

Durch Pfadabhängigkeiten wird die zukünftige Entwicklung von Entscheidungen in der Vergangenheit beeinflusst. Jede langfristige Transformation ist von derartigen Pfadabhängigkeiten gekennzeichnet. Die lange Wirkungsdauer von politischen Entscheidungen trägt zusätzlich dazu bei, dass sich die Umsetzung der EW hinauszögert (acatech, Leo-

poldina & Akademienunion 2017b). Produktionsstruktur, logistische Entscheidungen oder Vorlieferketten sind auf den Einsatz fossiler Energieträger abgestimmt und hemmen die Transformation, weil die Umstiegskosten nicht über den Markt abgebildet werden (IEA 2017).

Bestehende Technologien, Institutionen und Verhaltensweisen schränken Energie- und Klimaschutz in den kommenden Jahrzehnten ein. Diese auch als „Carbon lock-in“ bezeichnete Form der Pfadabhängigkeit beruht darauf, dass sich physische, ökonomische und soziale Restriktionen in komplexen Systemen wechselseitig verstärken und Veränderungen begrenzen (Seto et al. 2016). Demnach lassen sich infrastrukturelle und technologische, institutionelle, verhaltensgetriebene und weitere unabhängige Lock-in-Effekte unterscheiden. Acatech, Leopoldina & Akademienunion (2017b) beschreiben verschiedene Formen der Pfadabhängigkeiten. Skaleneffekte und sunk costs in Form hoher Investitions- und Fixkosten der fossilen Technologien setzen einen Anreiz, weiterhin die etablierte Technologie zu nutzen. Dadurch verstetigen sich herkömmliche Technologien. Auf der Konsumentenseite können ebenfalls Pfadabhängigkeiten entstehen: Zum einen trägt die Bekanntheit einer Technologie dazu bei. Je verbreiteter das Wissen über die Funktionsweise ist, umso geneigter sind die Konsumenten/-innen, die Technologie zu übernehmen. Zum anderen bestimmen die Erwartungen über die zukünftige Entwicklung das Nutzerverhalten, sodass als vielversprechend wahrgenommene Technologien eher angewendet werden. Die sich hieraus ergebenden Pfadabhängigkeiten erschweren die Verbreitung von neuen EW-Technologien, können bei einem entsprechenden Verbreitungsgrad jedoch ins Gegenteil kippen.

Am häufigsten werden die Wirkungen infrastruktureller und technologischer Lock-ins für den Kraftwerkspark berechnet. Nach Pfeiffer et al. (2018) würde der Betrieb der bestehenden und geplanten fossilen Kraftwerke weltweit bis an ihr geplantes Abschaltdatum zu Emissionen führen, mit denen das Pariser Klimaschutzziel deutlich überschritten würde. Ihr vorzeitiges Abschalten wiederum führt zu sog. stranded investments, der frühzeitigen Entwertung des Kapitalstocks.

Weniger betrachtet werden die Restriktionen, die sich aus den langlebigen Beständen von Industrieanlagen, Gebäuden und Fahrzeugen ergeben. Stahl- oder Zementwerke sind sehr kapitalintensiv und langlebig. Ein Wechsel beispielsweise von der Stahlerzeugung über die Hochofenroute hin zum weniger CO₂-intensiven Elektrostahlverfahren ist in den letzten Jahrzehnten in Deutschland kaum erfolgt. Angesichts weltweiter Überkapazitäten auf dem Stahlmarkt sind Investitionen in Neuanlagen in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten kaum oder allenfalls begrenzt zu erwarten. Bei Gebäuden machen die Neubauten trotz steigender Fertigstellungen aktuell deutlich weniger als ein Prozent des Bestands aus. Die Sanierungsrate wird auf eine Größenordnung von rund einem Prozent geschätzt. Heizungsanlagen werden nur alle 20 bis 25 Jahre erneuert, manche erst nach einem halben Jahrhundert. Weil die Lebensdauern so hoch sind, dürfte der Heizwärmebedarf entsprechend in den kommenden Jahren nur langsam zurückgehen.

Auch im Verkehr erfolgt der Wechsel der Fahrzeuge über lange Zeiträume. Die beiden großen Flugzeugbauer Airbus und Boeing sehen sich mit der sehr hohen weltweiten Nachfrage konfrontiert. Die Lieferzeiten liegen teilweise in einer Größenordnung von 5

bis 7 Jahren. Bei einer durchschnittlichen Betriebsdauer von 25 Jahren – die Lufthansa (2018) weist z. B. ein Durchschnittsalter ihrer Flotte von 11,4 Jahren aus, von 728 Flugzeugen wurden 29 im Jahr 2017 neu angeschafft – wird ein heute bestelltes Flugzeug erst im Jahr 2050 außer Betrieb genommen. Auch im Personenverkehr ist die Pfadabhängigkeit hoch. Zugelassene Pkw waren zum Stichtag 1.1.2017 im Schnitt 9,3 Jahre alt, die Tendenz ist steigend. Über 50 % der im Jahr 2003 zugelassenen Pkw waren zu diesem Zeitpunkt, d. h. über 13 Jahre später, immer noch zugelassen (KBA 2017). Danach werden viele noch im Ausland weiter betrieben. Flottengrenzwerte nach EU-Vorgaben für Ende 2021 in Höhe von 95 g CO₂/km sind für deutsche Autobauer eine sehr große Herausforderung. Selbst wenn sie im Realbetrieb auf der Straße eingehalten werden, bedeutet das im Umkehrschluss aber auch, dass im Jahr 2022 neu zugelassene Pkw im Jahr 2035 noch durchschnittlich 95 g CO₂/km emittieren werden. Zu diesen technischen Restriktionen kommen die oben aufgeführten institutionellen und verhaltensgetriebenen Pfadabhängigkeiten. Fehlende Ladeinfrastruktur macht Elektromobilität in Deutschland in vielen Fällen noch unattraktiv. Das Haus „auf der grünen Wiese“ ohne Anschluss an den ÖPNV zwingt die Eigentümer zur dauerhaften Pkw-Nutzung. Viele Maßnahmen wie CO₂-Preise für THG-Emissionen des Verkehrs, die Änderungen dieses Zustand anreizen könnten, sind mit finanziellen Nachteilen für Hauseigentümer/-innen verbunden und reduzieren letztlich den Wert des Hauses. Entsprechend groß sind die Kräfte, diese Strukturen zu erhalten. Ein Infrastrukturausbau, wie der Neubau einer ICE-Strecke in der Lausitz, könnte dagegen helfen, diese Effekte zu reduzieren. Ein Ausbau des ÖPNV wäre sicher noch wirksamer.

Bislang gestalten sich die politischen Strategien und Instrumente der EW als nicht effektiv genug, um diese Pfadabhängigkeiten zu überwinden und somit den Umbau des Energiesystems zu fördern, wie die erwartete deutliche Zielverfehlung des Klimaschutzziels von 40 % im Jahr 2020 verdeutlicht. Neben der Förderung und Markteinführung von EW-Technologien müssen Maßnahmen ergriffen werden, die die konventionellen, emissionsintensiven Anlagen aus dem Energiesystem verdrängen. Wegen der oben dargestellten langen Lebenszyklen müssen die besten verfügbaren Technologien für Ersatzinvestitionen genutzt werden. Die Förderung von fossilen Heizungsanlagen ist in dieser Hinsicht z. B. nicht sinnvoll. Die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ ist dagegen ein Beispiel für ein entsprechend integriertes Vorgehen. Außerdem muss die Netzinfrastruktur stärker mit der Energiewende synchronisiert werden, wobei die lange Dauer der Umsetzungsprozesse berücksichtigt werden muss. Zudem müssen vonseiten der Politik Möglichkeiten geschaffen werden, die Innovationen in die Umgestaltung des Energiesystems einbinden, um Hindernisse und Verzögerungen zu vermeiden (Matthes 2018).

Darüber hinaus sollte bei dem Einsatz aller Instrumente die Möglichkeiten der Sektorkopplung mit bedacht werden, sodass das gesamte Energiesystem im Sinne der EW umgebaut werden kann. Eine Fokussierung der Maßnahmen auf einzelne Bereiche führt dazu, dass die Interdependenzen zwischen Strom-, Wärme- und Verkehrssektor vernachlässigt werden, wodurch sich ein weiterer Engpass für die EW ergeben kann. Eine Zusammenführung von regionalen Strategien kann zu einer effektiveren Umsetzung der EW beitragen (acatech, Leopoldina & Akademienunion 2017b).

Selbst wenn diese systemischen Fragen gelöst sind, muss der Strom vom Erzeuger zum

Nutzer. Derzeit wird der Netzausbau als einer der Hauptengpässe der Stromwende gesehen und war für Bundeswirtschaftsminister Altmaier Anlass zu einer Ministerreise (BMWi 2018a). Allerdings wird die tatsächlich Engpasseigenschaft des Netzausbaus auch bestritten (Quaschnig, Matthes 2018): Auf der einen Seite wird die Relevanz des Netzausbaus als hoch eingestuft, um z. B. der Flächenproblematik der EW entgegenzuwirken: Im Süden Deutschlands stehen sich ein hoher Energiebedarf aufgrund vieler Ballungszentren und knappe Flächenverfügbarkeit für Energieanlagen gegenüber. Hierbei können besser ausgebaute Leitungen mehr Flexibilität bei der Erzeugung erneuerbarer Energien bieten, da die EE-Anlagen somit nicht in dicht besiedelten Regionen gebaut werden müssen. Auf der anderen Seite wird argumentiert, dass der Netzausbau allein nicht die Energiewende vorantreiben kann und damit nicht entscheidend für ihren Erfolg ist. Demnach sollte für eine stärker dezentrale Lösung eher das Verteilnetz ausgebaut werden, um Strom aus erneuerbaren Energien vor allem dort zu verbrauchen, wo er erzeugt wird.

Tatsächlich ergeben sich durch die Verzögerung des Netzausbaus Kosten für Redispatch- und Einspeisemanagement-Maßnahmen. Im Jahr 2017 lagen diese bei rund 1,4 Mrd. Euro (BNetzA 2018b). Aktuell lässt sich ein Rückstand beim Netzausbau feststellen: Von den 7700 km Leitungen, die in dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG) und dem Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen (EnLAG) geplant werden, wurden bislang lediglich 22,7 % genehmigt und 12,3 % umgesetzt (BNetzA 2018a). Um den Netzausbau voranzutreiben, wurde der Aktionsplan Stromnetz erarbeitet (BMWi 2018b). Neben einer Beschleunigung des Baus von neuen Leitungen sieht dieser eine Optimierung und höhere Auslastung des bestehenden Netzes vor.

4 FAZIT UND AUSBLICK

Als Ergebnis der Literaturrecherche zu möglichen Engpässen der Energiewende sind verschiedene Punkte bei der Produktion von EW-Gütern aufzuführen. Daneben bestehen übergreifende strukturelle Restriktionen für die Energiewende.

Aus Sicht verschiedener Studien und Befragungen sind in den Bereichen Finanzierung, Arbeitsmarkt, Rohstoffversorgung, Vorprodukte, Flächen und Entsorgung Beschränkungen für die Produktion von Energiewendegütern im weiteren Sinne absehbar. Die Verfügbarkeit qualifizierter Arbeitskräfte und bestimmter wichtiger Rohstoffe sind dabei als besonders kritisch einzuschätzen. Es besteht Bedarf an einem kontinuierlichen Monitoring und staatlichem Handeln, um absehbaren Engpässen möglichst frühzeitig entgegenzuwirken. Langfristig ist eine bessere, auf die Energiewende hin angepasste Qualifizierung des Arbeitskräfteangebots notwendig, auf kurze Frist können die Engpässe durch die zeitliche Anpassung der Durchführung der EW-Projekte an die Verfügbarkeit von Arbeitskräften abgeschwächt werden.

Langfristig ist es vor allem die Konkurrenz auf dem Arbeitsmarkt um die besten Fachkräfte, die sich als Engpass erweisen kann. Wenn die Energiewende ebenfalls auf die stark ausgelastete Bauwirtschaft für die Sanierung von Gebäuden, den Bau von Leitungen, den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Zuwegung zu neuen Anlagen, den

Ausbau des Radwegenetzes und den generellen Ausbau von Infrastruktur setzt, kann es zu einem deutlichen Nachfrageüberschuss kommen mit der Folge, dass sich der Fortgang der Energiewende verlangsamen könnte.

In der folgenden Tabelle 5 sind die Engpässe nach erster eigener Einschätzung mit Blick auf drei Gesichtspunkte eingeordnet: Erstens die mögliche Betroffenheit der Energiewende durch die Engpässe, zweitens die erwartete Zeitdauer der Engpässe, bis sie durch Marktkräfte und ggfs. unterstützendes staatliches Handeln wieder behoben sein sollten, und drittens, ob mit Fortgang der Energiewende eine zu- oder abnehmende Tendenz der Engpässe zu erwarten ist.

Mögliche Knappheiten bei Rohstoffen, Vorprodukten und Flächen betreffen einzelne EW-Güter. Marktprozesse können die Engpässe teils kurzfristig lösen, bei der Erschließung einzelner Rohstoffe sind auch Zeiträume von fünf bis zehn Jahren denkbar, weil möglicherweise erst Investitionsentscheidungen in Schwellen- oder Entwicklungsländern getroffen werden müssen und auch die Finanzierung oder Klärung von Rechtsicherheit zusätzlich Zeit in Anspruch nehmen können. Mit Fortschreiten der globalen Energiewende dürften diese Engpässe zunehmen, auch die Flächenverfügbarkeit könnte zunehmend zum Engpass werden.

Engpässe bei der Finanzierung könnten Investitionen in die Energiewende insgesamt betreffen. Bei wieder steigendem Zinsniveau könnten diese Engpässe zunehmen. Allerdings stellt die KfW vielfältige Förderprogramme bereit, die diese zukünftig möglichen Engpässe zumindest abmildern dürften.

Arbeitskräfteknappheit dürfte auch zukünftig je nach Branche, Ausbildung, Beruf und Region unterschiedlich ausfallen. Mit der insgesamt weiter wachsenden Arbeitsnachfrage und der zu erwartenden demografischen Entwicklung, nach der das inländische Arbeitsangebot zukünftig sinken wird, könnten Engpässe in diesem Bereich zukünftig verstärkt auftreten. Mit vorausschauender Bildungspolitik und Fachkräftezuwanderung kann dem aber entgegengewirkt werden.

Engpässe aus der Entsorgung von EW-Gütern sollten auch zukünftig eher kurzfristiger Art bleiben und nur einzelne Güter betreffen.

Tabelle 5: Einschätzung der Engpässe der Energiewende

	Betroffenheit EW	Zeitdauer	mit der EW
Rohstoffe, Fläche, Vorprodukte	einzelne EW-Güter	kurz- bis mittelfristig	zunehmend
Finanzierung	Investitionen in die EW	kurz- bis mittelfristig	bei höheren Zinsen zunehmend
Arbeitskräfte	Branchen, Berufe	kurz- bis mittelfristig	zunehmend
Entsorgung	einzelne EW-Güter	kurzfristig	zunehmend
Rebound-Effekte	Wirkung der Investitionen in die EW	langfristig	-
Pfadabhängigkeiten/ Lock-in-Effekte	Investitionen in die EW	langfristig	zunehmend

Quelle: eigene Zusammenstellung

Bei den übergreifenden Begrenzungen reduzieren Rebound-Effekte die Wirkung von Investitionen in die Energiewende dauerhaft. Pfadabhängigkeiten und daraus entstehende Lock-ins hemmen dagegen Investitionen in die EW selbst. Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte wirken über die gesamte Lebensdauer der Anlagen, Fahrzeuge oder Geräte.

Forschung und Entwicklung können dazu beitragen, die identifizierten möglichen Engpässe zu vermeiden oder zumindest klein zu halten. So kann die Knappheit von Rohstoffen durch einen effizienteren Einsatz oder die Substitution durch andere Materialien abgemildert werden. Zugleich lassen sich damit neue Technologien für den Weltmarkt entwickeln. Sowohl aus ökologischer Sicht als auch hinsichtlich sozialer Nachhaltigkeit ist die Begrenzung des Abbaus von kritischen Rohstoffen erstrebenswert.

Die übergreifenden Begrenzungen der Energiewende sind vor allem durch die Energiepolitik anzugehen. Rebound-Effekte führen dazu, dass energiepolitische Maßnahmen im Endeffekt weniger wirksam sind als aus Ingenieurssicht erwartet. Trotz Steigerung der Energieeffizienz steigt die Energienachfrage über verschiedene Kanäle. Die Rebound-Effekte können durch angemessene Politikgestaltung begrenzt werden. Mengensteuerung in Form globaler oder nationaler Caps (Zertifikatslösung) sind deutlich besser geeignet sie zu verhindern als kleinteilige Regulierung (Semmling et al. 2016). Die Autoren schlagen daneben verschiedene Gestaltungsvarianten von Effizienzförderung, Standards und Informationsbereitstellung vor, um Rebounds einzudämmen.

Bei der Infrastruktur, den langlebigen Kapitalstöcken und Beständen, deren langfristige Transformation notwendig ist, um die Ziele der Energie- und Klimapolitik zu erreichen, sind die Pfadabhängigkeiten stärker als bisher in die Betrachtung und die Politikgestaltung mit einzubeziehen. Neue Handlungsoptionen sind zu entwickeln. Dazu ist der langfristige Dialog mit den Eigentümern und ihren Vertretern notwendig. Die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ ist ein erster wichtiger Schritt. Eine umfangreiche Informationsbasis, z. B. darüber, wann energieintensive Anlagen wie Stahlwerke oder Zementöfen neu gebaut wurden, welche durchschnittliche Lebensdauer die Anlagen haben und welche weiteren Engpässe auch im Sinne der oben aufgeführten Punkte bestehen können, wird eine wichtige Grundlage hierfür sein. Sie ist bisher nicht in allen Fällen (frei) verfügbar.

Schließlich sind die hier nicht betrachteten möglichen Engpässe in Form von Akzeptanzproblemen oder Flächenkonkurrenzen bei der Gestaltung der Energiewende zukünftig ebenfalls stärker zu berücksichtigen.

LITERATURVERZEICHNIS

- acatech, Leopoldina & Akademienunion (2017a): Rohstoffe für die Energiewende. Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung. Berlin.
- acatech, Leopoldina & Akademienunion (2017b): Pfadabhängigkeiten in der Energiewende. Das Beispiel Mobilität. Berlin.
- Agentur für erneuerbare Energien [AEE] (2018): Die Digitalisierung der Energiewende. Metaanalyse. Berlin.
- Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J., Hagelüken, C., Herzig, P., Littke, R., Thauer, R. K., Wellmer, F.-W. (2016): Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse. München.
- Beckmann, J. (2012): Wieso Abfall? Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen. Installateur, 2, S. 28–31.
- BGR (2016): Mineralische Rohstoffe für die Energiewende. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGR (2017): Kobalt aus der DR Kongo – Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BIBB (2018a): Jahresbericht 2017. Bonn.
- BIBB (2018b): QuBe-Datenportal. URL: www.qube-data.de [abgerufen am 05.07.2018].
- BMF & BMWi (2018): Gesamtwirtschaftliches Produktionspotenzial und Konjunkturkomponenten. Datengrundlagen und Ergebnisse der Schätzungen der Bundesregierung. URL: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Abt_1/1110171a5002.pdf;jsessionid=99306AE4694B729E47CF2D22219C6D13?__blob=publicationFile&v=11 [abgerufen am 29.10.2018].
- BMU (2011): Erneuerbare Energien. Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft. Berlin.
- BMU (2017): Langfristige Regeln zur Entsorgung HBCD-haltiger Abfälle. URL: <https://www.bmu.de/meldung/langfristige-regeln-zur-entsorgung-hbcd-haltiger-abfaelle/> [abgerufen am 25.06.2018].
- BMWi (2018a): #NetzeJetzt – Bundesminister Altmaier auf Rundreise zum Netzausbau. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/netzausbau-reise.html> [abgerufen am 27.08.2018].
- BMWi (2018b): Aktionsplan Stromnetz. Berlin.
- BNetzA (2018a): Leitungsvorhaben. URL: https://www.netzausbau.de/leitungsvorhaben/de.html?cms_map=1 [abgerufen am 15.08.2018].
- BNetzA (2018b): Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen. Gesamtjahr und Viertes Quartal 2017. Bonn.

- Bundesagentur für Arbeit (2016): Beschäftigte nach Berufen (KldB 2010) (Quartalszahlen). Nürnberg.
- Bundesagentur für Arbeit (2018): Fachkräfteengpassanalyse. Berichte: Blickpunkte Arbeitsmarkt. Nürnberg.
- Chakravarty, D., Dasgupta, S. & Roy, D. (2013): Rebound effect: how much to worry? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, pp. 216–228. DOI: 10.1016/j.co-sust.2013.03.001
- DERA (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- DERA (2017): Rohstoffbewertung – Lithium. Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- Deutsche Handwerks Zeitung (2017a): PUR- und PIR-Dämmung: Dämmstoffe werden knapp. URL: <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/daemmstoffe-werden-knapp/150/3094/352669> [abgerufen am 19.07.2018].
- Deutsche Handwerks Zeitung (2017b): HBCD-haltige Dämmstoffe: So läuft die Entsorgung künftig ab. URL: <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/entsorgungs-engpass-wohin-mit-den-alten-daemmstoffen/150/3094/337881> [abgerufen am 25.06.2018].
- Deutsche Handwerks Zeitung (2018): Solarmodule: So sauber ist die Entsorgung wirklich. URL: <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/solarmodule-so-sauber-ist-die-entsorgung-wirklich/150/3095/367546> [abgerufen am 25.06.2018].
- DIW (2017): Kommunale Investitionsschwäche: Engpässe bei Planungs- und Baukapazitäten bremsen Städte und Gemeinden aus. *DIW Wochenbericht* 11/2017, S. 211–219. URL: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.554462.de/17-11-5.pdf [abgerufen am 12.09.2018].
- Dütschke, E., Frondel, M., Schleich, J. & Vance, C. (2018): Moral Licensing – Another Source of Rebound?, *Ruhr Economic Papers* #747.
- EC (2010): Macro structural bottlenecks to growth in EU Member States. *Occasional Papers* 65. Brüssel.
- EC (2017a): Case study – technical analysis on capacity constraints and macroeconomic performance. *Technical Study on the Macroeconomics of Climate and Energy Policies*. Brüssel.
- EC (2017b): Technical report on model development – Representing finance constraints in a post-Keynesian macro-sectoral model. *Technical Study on the Macroeconomics of Energy and Climate Policies*. Brüssel.
- EC (2018): A technical analysis on decarbonisation scenarios – constraints, economic implications and policies. *Technical Study on the Macroeconomics of Energy and Climate Policies*. Brüssel.
- Eurostat (2018): Current level of capacity utilization in manufacturing industry, code

teibs070. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=teibs070&language=en> [abgerufen am 27.08.2018].

IEA (2017): Real-world policy packages for sustainable energy transitions. Shaping energy transition policies to fit national objectives and constraints. Paris.

IEA (2018): Oil market report. Paris.

KBA (2017): Bestand am 1. Januar 2017 nach Fahrzeugalter. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2017/2017_fahrzeugalter_node.html [abgerufen am 13.09.2018].

KfW (2018): KfW-Kommunalpanel 2018. Frankfurt am Main.

Lehr, U. (2014): Beschäftigungssituation und Beschäftigungstrend: Wie viele Fachkräfte benötigt die Branche? In: Benzer, U., Döring, O., Fischer-Wolfarth, J., Freiling, T., Hartmann, E., Hartmann, M., Krenn, S., Lehr, U., Neumann, K., Räß, S., Schmidt, S., Stamm, I., Stübe, U., Vode, D., Zander, O., Loebe, H. & Severing, E. (2014): (Aus-)Bildung für die Energiewende – Qualifizierungsbedarf und -ansätze für die Branche erneuerbare Energien. Forschungsinstitut Betriebliche Bildung (f-bb), Wirtschaft und Bildung 68, Bielefeld, S. 35–48.

Lehr, U., Wolter, M. I., Großmann, A., Wiebe, K. & Fleissner, P. (2016): Knappe Metalle, Peak Oil und mögliche wirtschaftliche Folgen – Vergleich zweier ökonomischer Modelle zu möglichen Folgen von Verfügbarkeitsgrenzen bei fossilen Energien und Metallen. In: Exner, A., Held, M. & Kümmerer, K. (Hrsg.): Kritische Metalle in der Großen Transformation, Berlin/Heidelberg, S. 235–248.

Lufthansa (2018): Flotte. URL: <https://investor-relations.lufthansagroup.com/de/fakten-zum-unternehmen/flotte.html> [abgerufen am 12.09.2018].

Lutz, C. & Breitschopf, B. (2016): Systematisierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte und Verteilungswirkungen der Energiewende. GWS Research Report 2016/01. Osnabrück.

Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U., Kemmler, A., Kirchner, A. auf der Maur, A., Ziegenhagen, I., Wunsch, M., Koziel, S., Piégsa, A. & Straßburg, S. (2018): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende, Studie im Auftrag des BMWi, Osnabrück, Basel (unveröffentlicht).

Madlener, R. & Alcott, B. (2011): Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkoppelung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen. Studie im Auftrag der Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“ des Deutschen Bundestages, Zürich.

Madlener, R. & Turner, K. (2016): After 35 Years of Rebound Research in Economics: Where Do We Stand? In: Santarius et al. (Ed.): Rethinking Climate and Energy Policies. New Perspectives on the Rebound Phenomenon. Springer, New York. S. 17–35.

Matthes, F. (2018): Neue Schwerpunktsetzungen für die Klimapolitik in Deutschland.

- ifo Schnelldienst 1, München, S. 18–22.
- Misereor (2018): Rohstoffe für die Energiewende. Menschenrechtliche und ökologische Verantwortung in einem Zukunftsmarkt. Aachen.
- Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende.
- Pfeiffer, A., Hepburn, C., Vogt-Schilb, A. & Caldecott, B. (2018): Committed emissions from existing and planned power plants and asset stranding required to meet the Paris Agreement, *Environmental Research Letters* 13, 5. URL: <http://iop-science.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabc5f/pdf>.
- Pothen, F. (2014): Dynamic Market Power in an Exhaustible Resource Industry. The Case of Rare Earth Elements. ZEW Discussion Paper No. 14-005. Mannheim.
- Prognos (2015): Arbeitslandschaft 2040. Studie im Auftrag der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft.
- Quaschnig, V. & Matthes, F. (2018): Netzausbau – „entscheidend für den Erfolg der Energiewende“ oder „reine Bremstaktik“? Ein Streitgespräch zwischen Volker Quaschnig, Professor für Regenerative Energiesysteme an der HTW Berlin, und Felix Matthes, Forschungskordinator für Energie- und Klimapolitik am Öko-Institut, Interview von Astrid Dähn und Jörg-Rainer Zimmermann. *neue energie* 07, S. 16–23.
- Räb, S. U. (2014): Berufsbildung im Bereich der erneuerbaren Energien zukunftsfähig gestalten – junge Menschen für moderne Technologien begeistern. In: Benzer, U., Döring, O., Fischer-Wolfarth, J., Freiling, T., Hartmann, E., Hartmann, M., Krenn, S., Lehr, U., Neumann, K., Räb, S., Schmidt, S., Stamm, I., Stübe, U., Vode, D., Zander, O., Loebe, H. & Severing, E. (2014): (Aus-)Bildung für die Energiewende – Qualifizierungsbedarf und -ansätze für die Branche erneuerbare Energien. *Forschungsinstitut Betriebliche Bildung (f-bb), Wirtschaft und Bildung* 68, Bielefeld, S. 11–17.
- Santarius, T. (2012): Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal.
- Semmling, E., Peters, A., Marth, H., Kahlenborn, W. & de Haan, P. (2016): Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden? Ein Handbuch für die umweltpolitische Praxis, Broschüre des Umweltbundesamts (UBA).
- Seto, K., Davis, S., Mitchell, R., Stokes, E., Unruh, G. & Ürge-Vorsatz, D. (2016): Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 41, pp. 425–452.
- UBA (2013): Weltweites „Aus“ für Flammschutzmittel HBCD. Verbot wirkt nach einem Jahr Übergangsfrist. Presseinformation Nr. 23/2013, Dessau-Roßlau.
- UBA (2015): Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik. Dessau-Roßlau.

- UBA (2016): Rebound-Effekte. Empirische Ergebnisse und Handlungsstrategien. Dessau-Roßlau.
- UBS (2017): UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead? URL: http://www.iom3.org/sites/default/files/news-documents/Automotive_Materials_EV_UBS_May_2017.pdf [abgerufen am 26.06.2018].
- van den Bergh, J. C. (2011): Energy Conservation More Effective With Rebound Policy. *Environmental and Resource Economics* 48 (1): S. 43–58.
- VDI & IW (2018): Ingenieurmonitor 2018/I: Der regionale Arbeitsmarkt in den Ingenieurberufen. Düsseldorf.
- Wohlrabe, K. & Wollmershäuser, T. (2018): Gesamtwirtschaftliche Kapazitäten zunehmend überausgelastet. *ifo Schnelldienst* 4/2018, 22. Februar 2018, S. 68. URL: <https://www.cesifo-group.de/DocDL/sd-2018-04-wohlrabe-wollmershaeuser-kapazitaetsauslastung-2018-02-22.pdf> [abgerufen am 25.10.2018].