

GWS RESEARCH REPORT 2018/7

Vorteile der Energiewende über die gesamtwirtschaftlichen Effekte hinaus – eine literaturbasierte Übersicht

Christian Lutz, Ulrike Lehr, Lisa Becker (GWS)
Barbara Breitschopf (ISI)

Impressum

KONTAKT

Dr. Christian Lutz

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

Dr. Ulrike Lehr

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

Lisa Becker

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

Dr. Barbara Breitschopf

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe, Barbara.Breitschopf@isi.fraunhofer.de

TITEL

Vorteile der Energiewende über die gesamtwirtschaftlichen Effekte hinaus – eine literaturbasierte Übersicht

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, November 2018

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung des Verfassers/der Verfasser und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH oder des Fraunhofer ISI wider.

HINWEIS

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

HERAUSGEBER DER GWS RESEARCH REPORT SERIES

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 2196-4262

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Kostensenkung bei Energiewendetechnologien	3
2.1 Technologie- und Marktentwicklung	3
2.2 Technologiekosten im Strom- und Wärmebereich	5
2.3 Technologiekosten und Energiepreise	10
3 Strukturwandel: Herausforderungen und Chancen	13
3.1 Überblick	13
3.2 Veränderungen in der Industrie und Energiewirtschaft durch die Energiewende	15
3.2.1 Strukturwandel inter- und intrasektoral	16
3.2.2 Neue oder veränderte Geschäftsmodelle und -felder	19
3.2.3 Vorteile und neue Perspektiven für die Industrie als Energiekonsument	21
3.3 Innovationen als Vorteil auf den Weltmärkten	22
4 Beiträge zur Energiesicherheit	25
5 Weniger Umweltkosten	29
6 Fazit	35
7 Literatur	37

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Globale LCOE von Windkraft an Land	3
Abbildung 2:	Lernraten bei Windkraft und Photovoltaik	4
Abbildung 3:	Installierte Leistung bei Windturbinen an Land nach Leistungsklassen	5
Abbildung 4:	Levelized Wind offshore Auktionspreise für ausgewählte Länder	6
Abbildung 5:	Wind onshore EEG-Vergütungssätze, Auktionspreise und installierte Leistung in Deutschland	7
Abbildung 6:	Zukünftige Gestehungskosten bei PV	7
Abbildung 7:	PV-Systemkosten und installierte Kapazität in Deutschland	8
Abbildung 8:	Entwicklung und Ausblick Batteriekosten global	8
Abbildung 9:	Anzahl verkaufter Wärmepumpen in Deutschland	9
Abbildung 10:	Entwicklung der Preise für Solarkollektoren in Deutschland	10
Abbildung 11:	Einzelhandelspreis Strom in Deutschland	11
Abbildung 12:	Entwicklung der Energiepreiskomponente bei Strom in Deutschland	12
Abbildung 13:	Veränderung der Bruttowertschöpfung bei E-Mobilität nach Bereichen	17
Abbildung 14:	Überblick über Veränderung von Marktvolumen bei GreenTech-Produkten in Deutschland	18
Abbildung 15:	Überblick über Veränderung von Marktvolumen bei GreenTech-Produkten weltweit	19
Abbildung 16:	Gründungen von Start-ups in Deutschland	21
Abbildung 17:	Außenhandelspezialisierung bei Klimaschutzgütern (CT)	23
Abbildung 18:	Entwicklung von Diversitätsindikatoren	27
Abbildung 19:	Umweltkosten durch THG und Luftschadstoffe	31
Abbildung 20:	Vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien	34

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Wirtschaftsstruktur und Energiewende in der Literatur – Zuordnung analysierter Themengebiete	14
Tabelle 2:	Höchstsätze für externe Kosten der Luftverschmutzung im Verkehr in ct ₂₀₁₀ /km (Anhang IIIb RL 2011/76/EU)	30
Tabelle 3:	Kostensätze für die Umweltschäden infolge von Stromerzeugung (in ct ₂₀₁₀ /kWh)	32
Tabelle 4:	Spezielle Kostensätze für Strom durch Geothermie und Biomasse (in ct ₂₀₁₀ /kWh)	32
Tabelle 5:	Kostensätze für die Umweltschäden infolge von Wärmeerzeugung (in ct ₂₀₁₀ /kWh)	32
Tabelle 6:	Kostensätze für die Umweltschäden durch Straßenverkehr (in ct ₂₀₁₀ /Pkm bzw. ct ₂₀₁₀ /tkm)	33

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
APERC	Asia Pacific Energy Research Center
BCG	Boston Consulting Group
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU(B)	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz(, Bau) und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
BWS	Bruttowertschöpfung
CAU	Christian-Albrechts-Universität Kiel
CCS	Carbon Capture and Storage
CT	Klimaschutztechnologie
CCT	Querschnittstechnologien
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DEA	Dänische Energieagentur
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DSM	Demand Side Management
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EET	Energieeffizienztechnologie
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
ETS	Emission Trading System
EU	Europäische Union
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln
EWT	Energieumwandlungstechnologie
Fraunhofer IEE	Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
Fraunhofer ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
FS-UNEP	Frankfurt School and United Nations Environment Programme
FuE	Forschung und Entwicklung
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung
IEA	International Energy Agency
IEA-PVPS	IEA Photovoltaic Power System Programme
IG-BCE	Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie
IRENA	International Renewable Energy Agency
kWp	Kilowatt Peak

LCOE	Stromgestehungskosten (Levelized cost of electricity)
MAP	Marktanreizprogramm
MEO	Merit-Order-Effekt
NRW	Nordrhein-Westfalen
Observ'ER	l'observatoire des énergies renouvelables
PPA	Power Purchase Agreement
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
RE	Renewable Energy (erneuerbare Energien)
RET	Technologie zur Nutzung erneuerbarer Energien
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
USD	US-Dollar
WP	Wärmepumpe

1 EINLEITUNG

Nimmt man das Jahr 2011 als Anfangspunkt der Energiewende, so geht sie in ihr achtetes Jahr; sie wird sogar volljährig, wenn man ihren Anfang auf das Jahr 2000 legt, in dem wesentliche Leitplanken für den Umbau der Energieversorgung hin zu einem nachhaltigen System gesetzt wurden. Die erreichten und zukünftigen Fortschritte auf dem Weg zu einer solchen Energieversorgung werden mit einer Vielzahl von Untersuchungen und Veröffentlichungen begleitet. Der jährliche Monitoringbericht beispielsweise hat ein Indikatorensystem entwickelt, das Fortschritte und die Zielerreichung ebenso abbildet wie Bereiche, in denen der Fortschritt noch auf sich warten lässt. Auch Veröffentlichungen zu den wirtschaftlichen Kenngrößen wie Beschäftigung und Investitionen der Energiewirtschaft (O'Sullivan, Edler & Lehr 2018), der Veränderung von Importen (Lehr, Lutz & Becker 2018) und der energiewirtschaftlichen Gesamtrechnung (Lehr, Walter & Lutz 2018) tragen zu diesem Prozess bei.

Zukünftige Zielerreichungen und ihre gesamtwirtschaftlichen und regionalen Effekten wurden zuletzt in Lutz et al. (2018) und in Ulrich, Lehr & Lutz (2018) analysiert. Diese Untersuchungen setzen ein breit gefächertes Modellinstrumentarium ein und lassen quantitative Aussagen über die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Energiewende im Vergleich zu einer Simulation ohne Energiewende zu. Verteilungswirkungen der Energiewende werden in Bach, Harnisch & Isaak (2018) quantifiziert.

Die Energiewende bringt jedoch weitere Vorteile jenseits von Beschäftigung und BIP, die teilweise nur schwer quantitativ und monetär zu erfassen sind. Internationale Organisationen wie die International Energy Agency (2014) für die Energieeffizienz und die International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016) für die erneuerbaren Energien beschreiben verschiedene dieser Aspekte. Manchmal erschließt sich der Zusammenhang mit der Energiewende dabei nicht auf den ersten Blick.

Zu diesen nur schwer quantifizierbaren Aspekten der Energiewende ist inzwischen eine umfassende Literatur erschienen, die in diesem Beitrag aufgegriffen und eingeordnet wird. Dabei wird zunächst der Frage nachgegangen, warum der jeweilige Aspekt von Vorteil sein könnte, wie die Energiewende auch in Zukunft zu dieser Vorteilhaftigkeit beitragen wird und was die einschlägige Literatur zu dieser Einschätzung beiträgt. Der Fokus liegt auf Deutschland, aber auch internationale Aspekte der Transformation werden aufgegriffen. Darüber hinaus gibt es weitere Vorteile der Energiewende wie z. B. ein erhöhter Wohnkomfort in einem gedämmten Haus, die im Folgenden nicht näher betrachtet werden.

Der starke Rückgang der Kosten von für die Energiewende relevanten Technologien ist gerade auch im globalen Rahmen ein beeindruckender Effekt und Vorteil der Energiewende. Die Entwicklung ist zum einen ein wichtiger Aspekt bei der Umsetzbarkeit der Energiewende, zum anderen jedoch auch ein wichtiger Treiber für technische Entwicklung und Innovation. Daher wird in Abschnitt 2 die Entwicklung der letzten Jahre kurz skizziert.

Mit den Kostensenkungen haben die Veränderung der Energieerzeugungsstruktur ebenso wie die Veränderung des Energieverbrauchs und seiner Struktur teilweise tiefgreifende Änderungen auf Produktionsprozesse, mögliche Gewinne und Kosten in der Industrie, sodass man hier vom Strukturwandel durch die Energiewende sprechen kann. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit vieler Unternehmen hängt davon ab, dass sie die neuen Technologien auf dem Heimatmarkt entwickelt und erprobt haben. Es entstehen dabei neue Geschäftsmodelle und -felder. Die Energiewende ist damit Teil einer umfassenden und kontinuierlichen Modernisierung und Strukturveränderung der Volkswirtschaft. Mit diesen Aspekten befasst sich Abschnitt 3.

Energiesicherheit stand angesichts stark steigender Ölpreise im Vordergrund etlicher Publikationen in den Jahren 2008 und 2009. Der Russland-Ukraine-Konflikt hat Befürchtungen über Lieferengpässe beim Erdgas geschürt. Inzwischen stößt das Thema erneut auf Interesse, sodass in Abschnitt 4 kurz die wesentlichen Ergebnisse und Argumentationen zusammengefasst werden. Außenpolitische Fragen spielen hierbei ebenfalls eine Rolle. Nicht zuletzt trägt die Reduktion des Energieverbrauchs und die Substitution fossiler Brennstoffe durch Energieträger auf Basis erneuerbarer Ressourcen zur Emissionsminderung von lokal und regional wirksamen Luftschadstoffen wie Stickoxiden, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, weiteren flüchtigen organischen Verbindungen, Feinstaubpartikeln, Staub und Ozon bei. Dadurch wird das Gesundheitsrisiko der Bevölkerung reduziert. Damit hilft die Energiewende Deutschland nicht nur, seinen internationalen Verpflichtungen etwa bei der Luftreinhaltung nachzukommen, sondern auch zur Minderung von Schäden, sogenannten negativen externen Effekten des Energieverbrauchs, die durch eben diese Emissionen hervorgerufen werden. Abschnitt 5 geht hierauf ein.

Das kurze Fazit in Abschnitt 6 fasst die wichtigsten Vorteile der Energiewende zusammen, die nach aktueller Literatur über die quantifizierbaren gesamtwirtschaftlichen Effekte hinausgehen.

2 KOSTENSENKUNG BEI ENERGIEWENDETECHNOLOGIEN

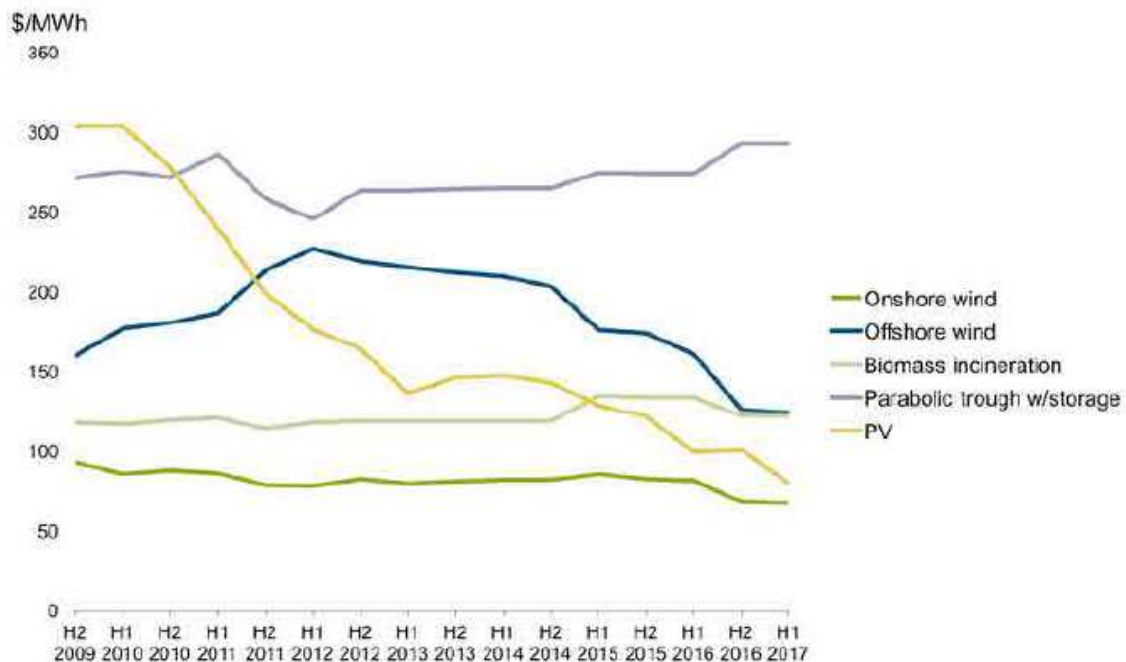
Für das von der EU Energy Union formulierte Ziel einer bezahlbaren und nachhaltigen Energieversorgung („affordable and sustainable energy supply“) spielen die Kosten von erneuerbaren Erzeugungstechnologien eine wesentliche Rolle. Auch in Deutschland ist seit 2004 die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom – seit 2008 auch von Wärme und Kälte – aus erneuerbaren Energien ein wesentliches Ziel der Energiegesetzgebung.

2.1 TECHNOLOGIE- UND MARKTENTWICKLUNG

Die technologische Weiterentwicklung wird bisher anhand verschiedener Indikatoren wie Innovation (Patentanmeldungen), Diffusion (installierte Leistungen) und Technologiekosten (Preise, Kosten) erfasst. Allerdings spielen für die Technologiekosten Produktions- und Marktentwicklungen eine Rolle, wie nachfolgend kurz diskutiert wird.

Abbildung 1: Globale LCOE von Windkraft an Land

FIGURE 9. LEVELISED COST OF ELECTRICITY, BY RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGY, 2009 TO 2017, \$ PER MWh



Quelle: FS-UNEP & BNEF (2018)

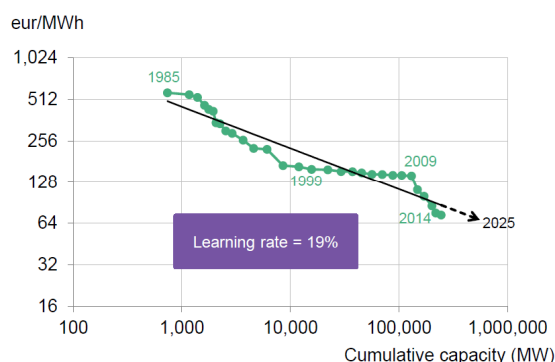
Die Technologiekosten bei Photovoltaik – aufgrund der geringen Betriebskosten wesentlicher Treiber der Erzeugungskosten – sind in Deutschland und global mit zuneh-

mendem Ausbau erneuerbarer Energien deutlich gesunken (Abbildung 1). Auch die Technologiekosten von Wind offshore zeigen in den letzten Jahren eine stark fallende Tendenz, während Wind onshore eine flachere Kostensenkung aufweist. Dahingegen sind die Kosten der Stromerzeugung mit Biomasse stark durch den Preis für Biomasse beeinflusst, der teils vom Ölpreis und weiteren Faktoren abhängig ist. Sie zeigen somit eher eine stagnierende, teils leicht ansteigende Entwicklung mit unklarem Trend.

In wissenschaftlichen Arbeiten werden verschiedene Aspekte diskutiert, welche die Kostenentwicklung beeinflussen. Welche Rolle allerdings die Marktförderung durch das EEG spielt und welchen Einfluss andere Faktoren haben, wie beispielsweise Materialpreise, Forschungsförderung, Wettbewerb, Skaleneffekte oder „learning by doing“, ist bisher nicht klar ausweisbar. Generell ist jedoch davon auszugehen, dass die Einspeisevergütungen einen positiven Einfluss auf die Rentabilität der Stromerzeugung mit erneuerbaren Technologien haben und über steigende Nachfrage nach erneuerbaren Technologien, durch „learning by doing“ und Skaleneffekten in der Produktion, Technologieentwicklung und Wettbewerb zu Preissenkungen führen (Diekmann et al. 2016). Verschiedene Studien haben sich mit der Kostenentwicklung ausgewählter Technologien befasst (z. B. Breitschopf 2016; Winkler et al. 2018; dalla Longa 2015) und entsprechende Lernkurven abgeleitet (Lindman & Söderholm 2012; Nemet 2006; Yu, van Sark & Alsema 2011), die erklären, welche Faktoren die Technologiekosten treiben und wie stark die einzelnen Technologiekosten bei zunehmendem Ausbau der erneuerbaren Erzeugungstechnologien (installierte Leistungen) sinken. Bloomberg New Energy Finance (Liebreich 2017) veröffentlicht jährlich Preisentwicklungen verschiedener erneuerbarer Erzeugungstechnologien und setzt diese in Relation zum kumulierten Ausbau (Abbildung 6). Diese weisen für Wind und Photovoltaik eine globale Lernrate von 19 % bzw. 24–28 % aus, d. h. bei einer Verdopplung der weltweit installierten Leistungen sinken die Kosten entsprechend dieser Raten.

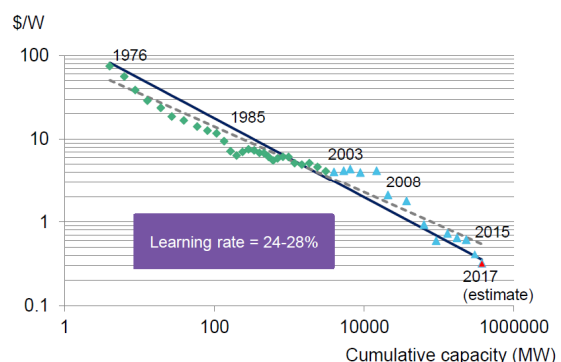
Abbildung 2: Lernraten bei Windkraft und Photovoltaik

Wind



Source: Bloomberg New Energy Finance

Solar



Source: Bloomberg New Energy Finance

Quelle: Liebreich (2017)

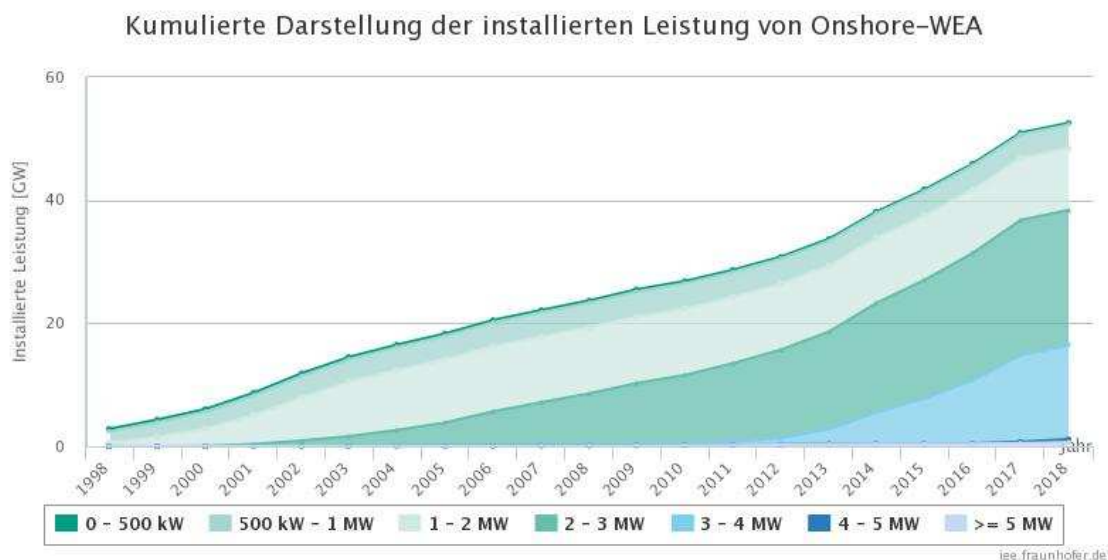
Basierend auf den obigen Ausführungen wird die Technologiekostenentwicklung als ein Ergebnis der Förderung bzw. des Ausbaus erneuerbarer Energien angesehen, wobei weitere Faktoren wie Forschungsförderung ebenfalls zu deren Entwicklung beigetragen haben. Die Technologiekostenentwicklung wird am Beispiel der Photovoltaik

und Windkraft, der Speichertechnologie (Batterie) und der Solarthermie/Wärmepumpe für die Wärmeerzeugung dargestellt. Auf die Wirkung der Technologiekosten auf die Strompreisentwicklung wird kurz eingegangen.

2.2 TECHNOLOGIEKOSTEN IM STROM- UND WÄRMEBEREICH

Ein wesentlicher Treiber der Technologiekosten bezogen auf die Leistung (kW) oder erzeugte Arbeit (kWh) ist die Weiterentwicklung von Komponenten, wie beispielsweise die Leistung der Turbinen, Nabenhöhe und Rotordurchmesser bei Windkraft (Morris & Pehnt 2016) oder die Effizienz der Module oder gar des kompletten Systems wie bei Photovoltaik. Der Trend zu leistungsstärkeren Turbinen oder größeren Rotordurchmessern für Windkraft an Land hält an; Turbinen von 2–3 MW dominierten im Jahr 2014, 2015 sind dies 3–4-MW-Turbinen, im Jahr 2017 auch zunehmend 4–5-MW-Turbinen, während leistungsstärkere Anlagen über 5 MW noch die Ausnahme bleiben (Fraunhofer IEE 2018b). Die Entwicklung der installierten Leistung von Onshore-Windkraftanlagen ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: Installierte Leistung bei Windturbinen an Land nach Leistungsklassen

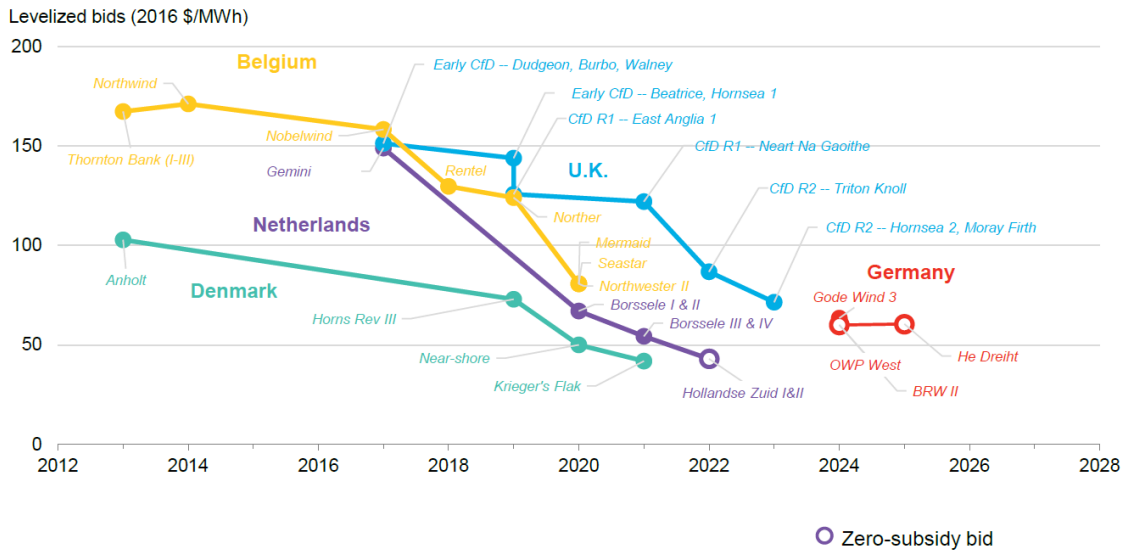


Quelle: Fraunhofer IEE (2018c)

Die Kosten der Windkraftanlagen richten sich nach deren Erzeugungskapazität. Daher bestimmen die Leistungsparameter wie Turbinengröße oder Rotordurchmesser die Technologiekosten. Die Kosten der Erzeugung setzen sich aus Investitionen – technische Anlagen, Installation, Fundament, Transport, Planung etc. – und Finanzierungskosten zusammen. Die gesamten Kosten betragen im Jahr 2015 im Mittel rund 1570 Euro/MW. Unter Berücksichtigung der Betriebsausgaben und der Volllaststunden (Standort) gibt sich eine Kostenspanne für die Gestehungskosten LCOE von 5,3 bis 9,6 ct/kWh (Fraunhofer IEE 2018b). In den USA wurden die Gestehungskosten für 2017 auf rund 51 USD/MW geschätzt (FS-UNEP & BNEF 2018). In anderen Ländern liegen die Kosten über diesem Satz, aber alle zeigen insgesamt eine leicht fallende Tendenz über die Jahre (vgl. Abbildung 1). Verschiedene Quellen (Liebreich 2017;

Blättel-Mink & Ebner 2009; BNEF 2018; IRENA 2018a) sehen für die Zukunft weitere Kostensenkungspotentiale (vgl. Abbildung 2). Diese Erwartungen spiegeln sich auch in den Auktionsergebnissen für Windkraftanlagen wider (Abbildung 4), da diese – insbesondere bei Wind offshore – erst nach 2020 erstellt werden müssen und somit das technologische Entwicklungspotential für Kostensenkungen ausgenutzt werden kann.

Abbildung 4: Levelized Wind offshore Auktionspreise für ausgewählte Länder



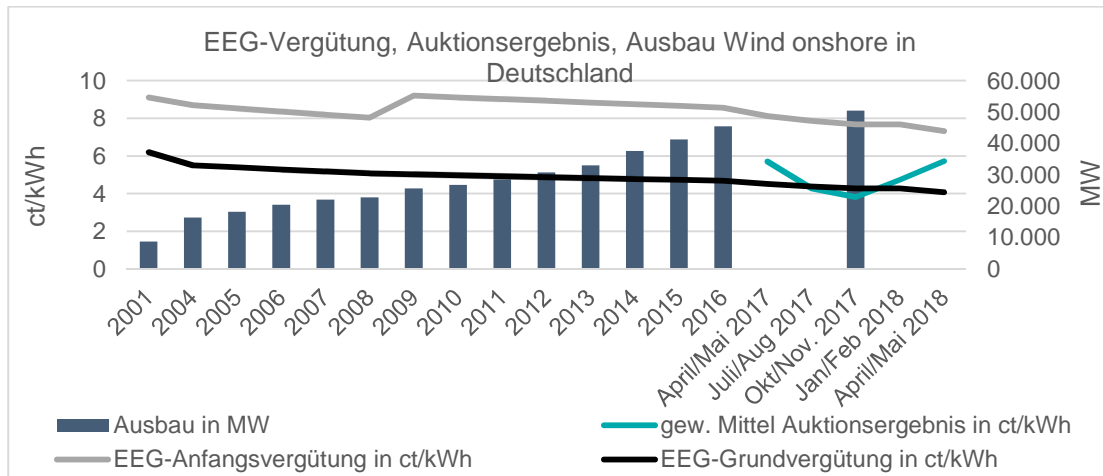
Source: Bloomberg New Energy Finance. Notes: Figures refer to an estimated project LCOE, taking into account tariff, inflation, merchant tail and a project lifetime. Horizontal axis refers to commissioning year.

Quelle: Cheung (2018)

Für Deutschland liegen keine Zeitreihen für die Gestehungskosten vor. Deshalb werden die Einspeisevergütungen sowie die gemittelten Auktionsergebnisse für Windkraft an Land zusammen mit den installierten Leistungen (kumuliert) in Abbildung 5 dargestellt. Der zunehmende Ausbau von Wind onshore bei leicht fallenden Einspeisevergütungen sowie die sehr niedrigen Auktionsergebnisse weisen auf fallende Investitionskosten bei Wind onshore hin, die nicht nur auf sinkende Technologiekosten, sondern auch auf gesunkene Finanzierungskosten (geringe Kosten für Kapital) zurückzuführen sind.

Eine ähnliche, aber deutlich stärkere Technologiekostenentwicklung hat im Bereich der Photovoltaik stattgefunden. Laut einer Studie des Fraunhofer ISE (2018) fielen seit 2006 die Investitionskosten für eine PV-Anlage um ca. 13 % p. a., also insgesamt um 75 %, wobei im Jahr 2006 noch mehr als zwei Drittel, in 2017 nur noch ungefähr die Hälfte der Investitionskosten auf die Module entfielen. Getrieben durch zunächst hohe Einspeisevergütungen haben sich die Produktion und der Markt für Module und Zellen in Deutschland und entsprechend auch weltweit rasant entwickelt, wobei neben der produktionstechnischen Entwicklung vor allem der durch die deutliche Senkung der Einspeisevergütungen entstandene Marktüberschuss die Marktpreise gedrückt hat.

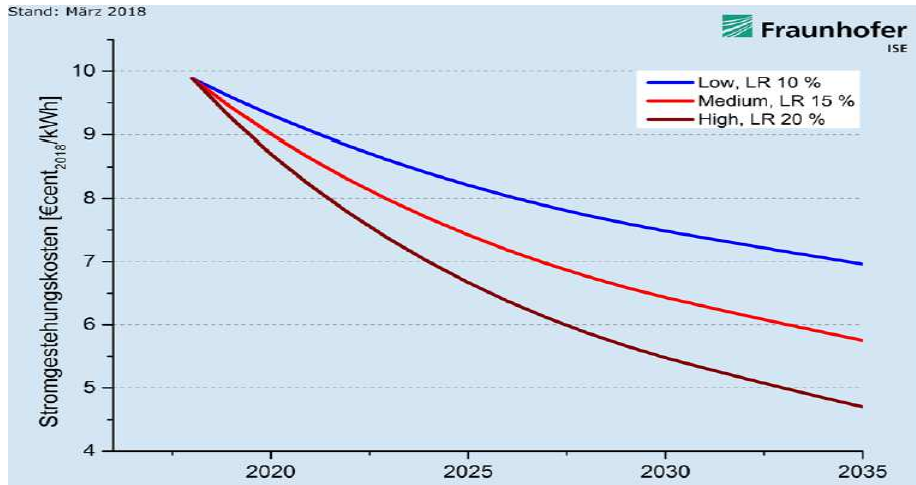
Abbildung 5: Wind onshore EEG-Vergütungssätze, Auktionspreise und installierte Leistung in Deutschland



Quelle: eigene Zusammenstellung basierend auf BMWi (2017), EEG, EEG Clearingstelle, IWR

Die Entwicklung der globalen LCOE für PV sind in Abbildung 1 dargestellt, die Kosten in Deutschland je kWp in Abbildung 7. Bei dieser Technologie werden weitere Kostensenkungspotentiale gesehen (Liebreich 2017; BNEF 2018; Hanusch, Ilg & Jung 2011; Kost & Schlegl 2018). So erwarten Kost & Schlegl (2018) mittlere Gestehungskosten von PV-Kleinanlagen in Höhe von unter 6 ct/kWh im Jahr 2035 (Abbildung 6).

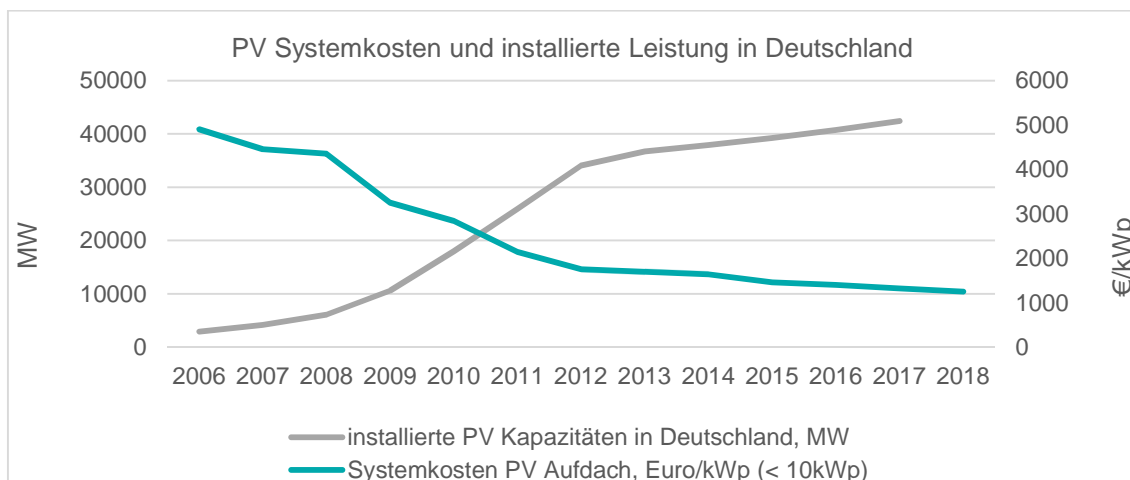
Abbildung 6: Zukünftige Gestehungskosten bei PV



Quelle: Kost & Schlegl (2018), Anmerkung: Kosten für PV-Kleinanlagen (mit 5–15 kWp)

Eine Gegenüberstellung von installierten Leistungen, Technologiekosten oder Einspeisevergütungen und Auktionspreisen (Abbildung 5 und Abbildung 7) zeigt eine negative Korrelation zwischen Ausbau erneuerbarer Energien und Kostensenkungen, d. h. mit steigendem Ausbau fallen die Kosten. Anzumerken ist, dass die Auktionsergebnisse für PV und Wind onshore in Deutschland nicht nur die erwartete Technologie-, sondern auch die Marktentwicklung und Wettbewerbsintensität widerspiegeln.

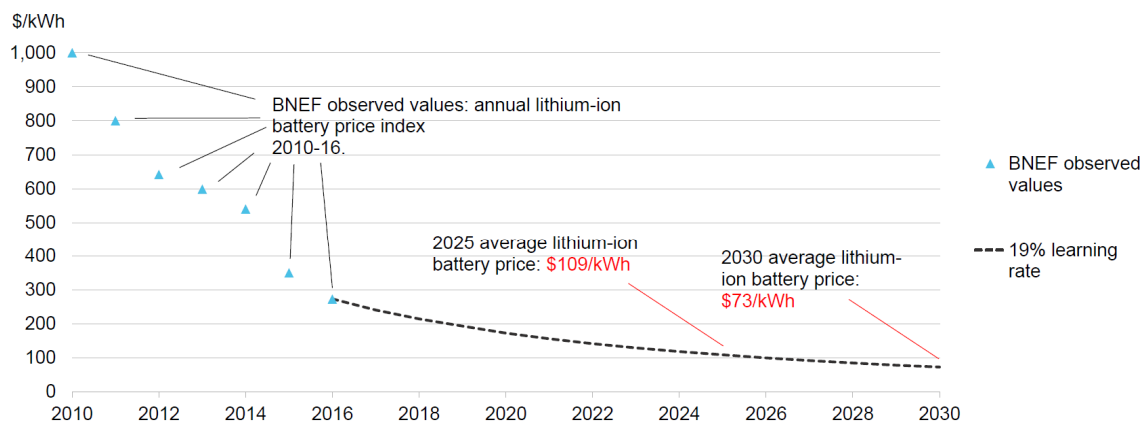
Abbildung 7: PV-Systemkosten und installierte Kapazität in Deutschland



Quelle: eigene Zusammenstellung basierend auf verschiedenen Quellen: AGEE-Stat (2018), Fraunhofer ISE (2018), IEA-PVPS (2018)

Neben den EE-Technologien zeigen auch die Kosten der Speichertechnologien eine fallende Tendenz auf. Batterien für E-Mobilität unterlagen zwischen 2010 und 2017 einer deutlichen Kostenreduktion (Abbildung 8), die sich gemäß verschiedener Quellen (Henbest 2017, Wietschel et al. 2017) und unter der Annahme einer weiter anwachsenden Nachfrage nach E-Mobilität entsprechend fortsetzen wird.

Abbildung 8: Entwicklung und Ausblick Batteriekosten global



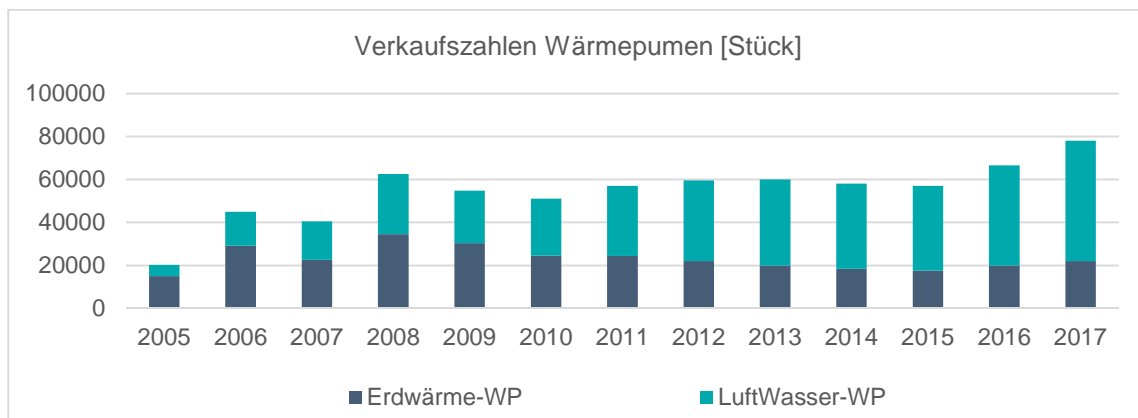
Source: Bloomberg New Energy Finance *EVO 2017*; Note: Prices are an average of BEV and PHEV batteries and include both cell and pack costs. Cell costs alone will be lower. Historical prices are nominal, future ones are in real 2016 U.S. dollars.

Quelle: Curry (2017) und Henbest (2017).

Im Bereich Wärme erfolgt der Ausbau erneuerbarer Energien mit sehr unterschiedlichen Technologien, wobei die biomassebasierte Wärmeerzeugung stark dominiert. Allerdings sind die Kosten dieser Art Wärmeerzeugung stark von den Brennstoffkosten – Biogas/-methan, biogenen Stoffen – abhängig. Neben den biomassebasierten Anwendungen werden Wärmepumpen und Solarkollektoren eingesetzt, die jedoch nur einen Anteil von knapp 8 % bzw. 5 % an der erneuerbaren Wärmeerzeugung haben (AGEE-Stat 2018).

Im Jahr 1980 wurden bereits so viele Wärmepumpen wie im Jahr 2005 verkauft. Allerdings waren die Verkaufszahlen anschließend rückläufig und nahmen erst wieder ab dem Jahr 2005 an Fahrt auf (Wenzel et al. 2015). Dieser Trend hat sich mit einigen Schwankungen bis 2017 fortgesetzt (Abbildung 9), wozu der Beginn der Förderung über das Marktanzreizprogramm im Jahr 2008 beitrug.¹ In einer Studie der Dänischen Energieagentur (DEA 2016) wurden die Lernkurven von Wärmepumpen für die Schweiz und Schweden betrachtet. In der Schweiz sanken die Kosten von Wärmepumpen zwischen 1985 und 2008 um rund 20 %, während im gleichen Zeitraum die Verkaufszahlen von 2.500 auf 20.000 Wärmepumpen (Anzahl) anstiegen. Eine ähnliche Entwicklung wurde für Schweden festgestellt: Anstieg verkaufter Wärmepumpen von 2.500 auf 40.000 Stück und Preisrückgang um 30 % im Zeitraum 1992–2006. Im Durchschnitt ergab sich somit eine Kostenreduktion um 7 % bzw. 8 % bei Verdopplung der Verkaufszahlen (Lernrate). Hierbei wird allerdings vermutet, dass die Kosten für die Installation der Wärmepumpen stärker abgenommen haben als diese für die Technologie, da die Technologie als internationales Gut gehandelt wird und somit die internationale Nachfrage Einfluss nimmt, während die Installation als Dienstleistung vor Ort erbracht wird und vollständig die nationale Nachfrage deckt.

Abbildung 9: Anzahl verkaufter Wärmepumpen in Deutschland



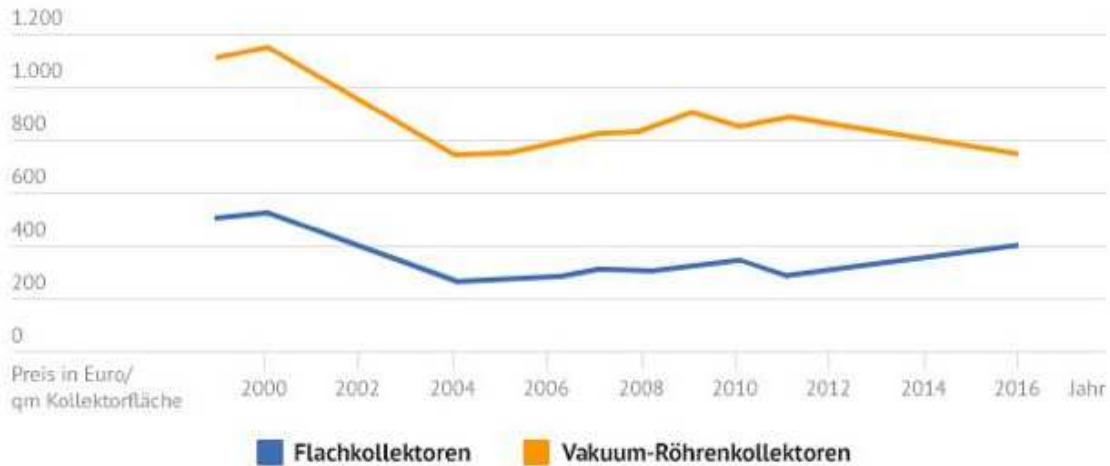
Quelle: BWP (2018)

Der Ausbau der Solarthermie wird gegenwärtig in Deutschland über das Marktanzreizprogramm gefördert. Der jährliche Zubau hat im Jahr 2009 seinen Höchststand erreicht und fällt seither beständig von ca. 2 Mio. m²/a auf unter 1 Mio. m²/a im Jahr 2017 (BSW 2018). Da Solarkollektoren in unterschiedlicher Größe gefertigt und für unterschiedliche Zwecke in unterschiedlicher Lage installiert werden, liegen nur wenige Informationen zu (historischen) Preisen von Solarthermieanlagen über einen begrenzten Zeitraum von 2000–2016 vor (Abbildung 10), obwohl diese Technologie schon vor 1990 am Markt angeboten wurde (Wenzel et al. 2015). Nach einem deutlichen Preisrückgang zwischen 2000 und 2004 für Flach- und Vakuum-Röhrenkollektoren unterliegen die Preise seit 2004 einer sehr mäßigen Entwicklung. Während die Preise bei Vakuum-Röhren ab 2011 einen leicht fallenden Trend ausweisen, sind diese für Flachkol-

¹ <http://ee-waerme-info.i-ner.de/index.php?title=Marktanzreizprogramm>

lektoren mit einer Unterbrechung im Jahr 2011 tendenziell eher steigend. Die Energiewende scheint den Ausbau und damit die Preise von Solarkollektoren wenig zu beeinflussen, obwohl Solarthermie im Bereich Niedertemperaturwärme ein gutes Nutzungspotenzial aufweist und einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten kann (Henning 2018).

Abbildung 10: Entwicklung der Preise für Solarkollektoren in Deutschland



Quelle: Käuferportal (2018)

Die betrachteten Technologien im Wärmebereich zeigen im Vergleich zu denen im Strombereich eine geringere Dynamik in der Entwicklung der Technologiekosten. Dies ist zum einen damit zu erklären, dass im Wärmebereich die dominante Erzeugungsförm durch die Brennstoffpreise geprägt ist und weitere Erzeugungstechnologien eine untergeordnete Rolle spielen und somit auch keine vergleichbare Dynamik im Ausbau aufweisen. Darüber hinaus sind die durch das MAP ausgelösten Nachfrageeffekte im Vergleich zum EEG gering. Gleichwohl besteht bei zunehmender Nachfrage nach diesen Technologien ein Kostenreduktionspotenzial – zumindest bei Wärmepumpen. Letzte dient in verschiedenen Klimaszenarien als relevante erneuerbare Wärmeerzeugung- und Sektorkopplungstechnologie, vorausgesetzt der Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor schreitet voran. Insofern ist eine weitere Förderung und Diffusion dieser Technologie bei zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor sinnvoll.

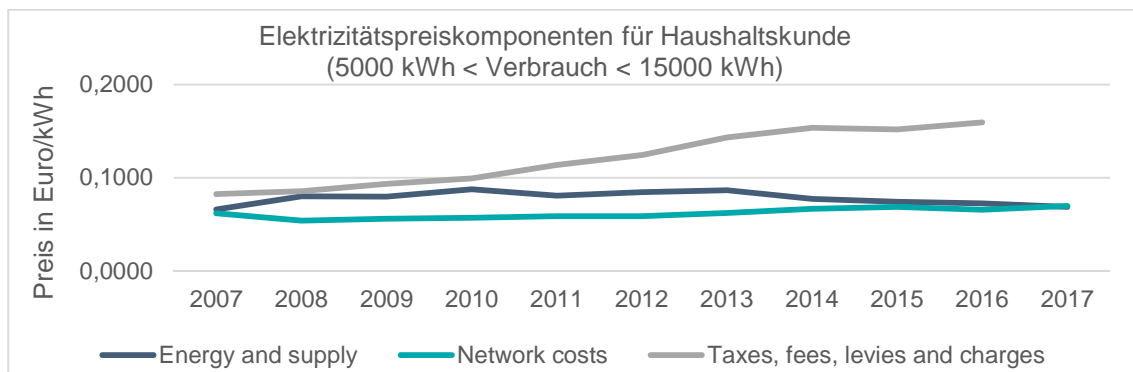
2.3 TECHNOLOGIEKOSTEN UND ENERGIEPREISE

Der Einsatz erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung beeinflusst zum einen den Großhandelspreis für Strom an der Börse, zum anderen über die mit dem Ausbau erneuerbarer Energien verbundenen Umlagen den Einzelhandelspreis für Endkunden. Beim Großhandelspreis wird die Merit-Order über die niedrigen Betriebskosten erneuerbarer Energietechnologien verändert, d. h. der Strompreis sinkt in der Regel mit dem Ausbau erneuerbarer Energien. Die fallenden Technologiekosten haben keine direkte Auswirkung auf den Börsenstrompreis, da sich bei fallenden Technologiekosten nicht zwangsläufig die Grenzkosten (variablen Kosten) der Produktion einer Energieeinheit verändern. Allerdings nehmen sie über den zunehmenden Anteil erneuerbarer Ener-

gien am Strommix indirekt Einfluss auf den Strompreis, d. h. die Erzeugungstechnologien mit hohen variablen Erzeugungskosten kommen immer weniger zum Einsatz.

Der Einzelhandelspreis setzt sich aus den Komponenten Energiebereitstellung, Netzentgelte sowie Steuern und Umlagen zusammen. Gegenwärtig steigen die Umlagen aufgrund des zunehmenden Ausbaus mit erneuerbaren Energien noch an, da sie die Gesteuerungskosten (d. h. nicht nur die variablen Kosten) abdecken und vom Kannibalisierungseffekt² der erneuerbaren Energien betroffen sind (Abbildung 11). Doch mit fallenden Technologiekosten sinken die Gesteuerungskosten. Daher werden langfristig auch sinkende Umlagezahlungen erwartet.

Abbildung 11: Einzelhandelspreis Strom in Deutschland



Quelle: Eurostat (2018a), eigene Darstellung

Die Energiepreiskomponente des Einzelhandelspreises zeigt eine verhaltene Entwicklung, die zum einen mit dem Ausbau erneuerbarer Energien (Merit-Order-Effekt³), niedrigen Kohle- und CO₂-Preisen sowie mit dem zunehmenden Wettbewerb im Strompreissektor erklärt wird (Breitschopf et al. 2016). Von diesen niedrigeren Strompreisen am Großhandelsmarkt profitieren überwiegend Großkunden, die direkt am Markt ihren Strom einkaufen, im geringen Umfang auch Haushalte (Abbildung 12).

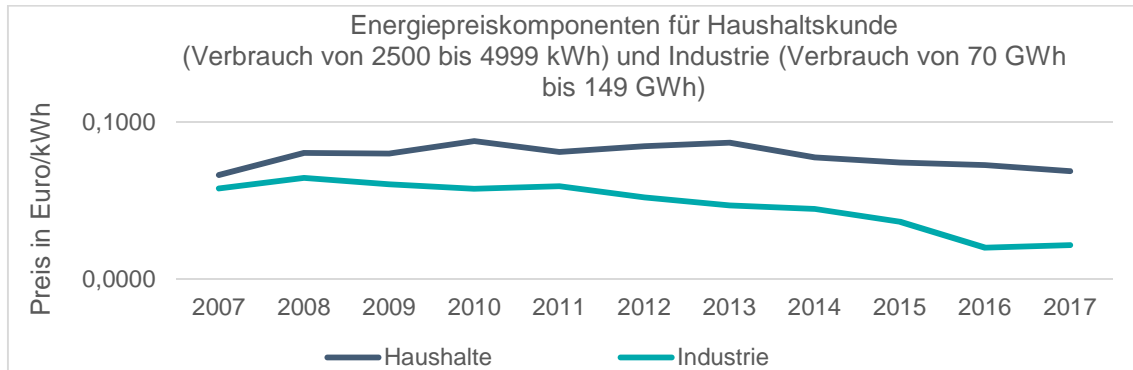
Kurzfristig hat der starke Ausbau der Photovoltaik zu einem deutlichen Anstieg der Strompreise für Endverbraucher geführt. Insgesamt führt jedoch ein zunehmender Ausbau erneuerbarer Energien unter c.p. langfristig zu fallenden Energie-/Strompreisen, sobald die EEG-Umlage sinkt. Diese Entwicklung ist auch in Szenarien hinterlegt, die die neuesten Technologiekostenentwicklungen aufgegriffen haben z.B. IRENA (2018b). Allerdings sind nicht allein die Technologiekosten von Wind- und So-

² Hierunter wird verstanden, dass die Differenz zwischen Einspeisevergütung und Marktpreis mit fallenden Marktpreisen bei hoher Einspeisung wächst.

³ Die Merit-Order bei der Stromerzeugung verändert sich aufgrund der geringen variablen Kosten (Grenzkosten) der Stromerzeugung mit erneuerbarer Energien, sodass zunehmend weniger Kraftwerke mit teuren fossilen Energieträgern Strom erzeugen. Der Strompreis fällt somit und der Strom wird an der Börse günstig gehandelt (Merit-Order-Effekt (MOE)). Hierzu wurden bereits verschiedene, relativ aufwendige Analysen basierend auf Strommarktmodellen oder ökonomischen Schätzungen durchgeführt. Quellen: Sensfuß 2008; Cludius et al. 2014; Fraunhofer ISI et al. 2015; Breitschopf et al. 2016.

larstrom Treiber der Strompreise, sondern beispielsweise die lokale Begrenzung natürlicher Ressourcen/Potenzial, der TechnologiemiX, Infrastrukturen, Ausgleichskosten, die in den Modellen hinterlegt sind. So weisen die Modellergebnisse die Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf die Einzelhandelspreise im Rahmen von gesamtwirtschaftlichen Analysen als Ergebnis der hinterlegten Ausbauszenarien und Politiken aus (Fraunhofer ISI et al. 2016 und 2014; IRENA 2018a und 2018b). Diese sind umso geringer, je niedriger die hinterlegten Technologiekosten sind.

Abbildung 12: Entwicklung der Energiepreiskomponente bei Strom in Deutschland



Quelle: Eurostat (2018a und 2018b), eigene Darstellung

3 STRUKTURWANDEL: HERAUSFORDERUNGEN UND CHANCEN

Strukturwandel bezeichnet nach Fourastié (1954) vereinfachend den Übergang von der agrarisch (Primärsektor) geprägten Wirtschaft über die Industriegesellschaft zur Dienstleistungsgesellschaft (tertiärer Sektor), der oftmals im Laufe der Wirtschaftsentwicklung eines Landes zu beobachten ist. Deutschland, und auch Japan, stellen hier als hochentwickelte Industrieländer – Deutschland zuletzt mit wieder leicht steigenden Anteilen der Industrie an der gesamten Wertschöpfung – eine Ausnahme im internationalen Vergleich dar, weil die Industrie eine große Bedeutung hat. Umso wichtiger ist es, die Einflüsse der Energiewende auf die Chancen und Risiken der Industrie umfassender zu betrachten.

3.1 ÜBERBLICK

Der Umbau der Energieversorgung wird oftmals mit Strukturwandel und Verlusten von Produktionsmöglichkeiten und Arbeitsplätzen, etwa im Ruhrgebiet der siebziger und achtziger Jahre oder im Braunkohletagebau angesichts des Ausstiegs aus der Braunkohle in Zukunft, in Verbindung gebracht. So äußert sich auch der Vorsitzende der IG-BCE (2014) und verlangt einen „geordneten Strukturwandel, der soziale Verantwortung mit ökonomischer Vernunft und ökologischer Effizienz verbindet“. Betrachtet man die Energiewende und den Wandel der Energiewirtschaft als Langfristprojekt, so sind zwangsläufig Verluste in einzelnen Bereichen wie der fossilen Energiebereitstellung damit verbunden. Gleichzeitig entstehen neue Unternehmen und Beschäftigungsfelder, die mit verschiedenen Chancen verbunden sind. Die Sektorkopplung bietet Chancen für die dann stärker verbundenen Bereiche. Die Energiewende findet in Branchen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Automobilindustrie statt, in denen Deutschland gut auf den Weltmärkten aufgestellt ist und traditionell deutliche Exportüberschüsse erzielt. BMU und BDI (2012) haben bereits im Jahr 2012 die vielfältigen Chancen einer Green Economy gemeinsam herausgearbeitet. Die positiven Aspekte des sektoralen Wandels sind immer wieder hervorzuheben, weil sie in der Regel breiter streuen als die negativen Effekte, die von den Betroffenen lautstark thematisiert werden. Dies liegt auch daran, dass häufig vorgelagerte Branchen von der Energiewende profitieren, wobei der Zusammenhang zwischen Energiewende und wirtschaftlichem Erfolg nicht immer offensichtlich ist.

Nachfolgend wird ein Überblick über Veröffentlichungen gegeben, die sich mit dem Zusammenhang von Strukturwandel in der Wirtschaft und der Energiewende befassen sowie positive Veränderungen in Strukturen und Geschäftsbereichen darstellen. Dabei wird unterschieden zwischen Anbietern und Nachfragern energiebezogener Produkte, die unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt sind.

Tabelle 1: Wirtschaftsstruktur und Energiewende in der Literatur – Zuordnung analysierter Themengebiete

	Anbieter von energiebezogenen Produkten und Technologien	Nachfrager von Energieprodukten
	Wachstum, gesamtwirtschaftlich und sektoral (szenarienbasiert)	
Sektorübergreifend	Bruttowertschöpfung (BWS), BIP, Konsum, Investition, Beschäftigung: [1–9,37]	Wettbewerbsfähigkeit: Energieintensität, BWS, Stromkostenanteil, Patente: [7]
Intrasektoral, entlang Wertschöpfungskette	Verlagerungen innerhalb der Automobilindustrie: Wertschöpfung, Patente entlang der Wertschöpfungskette: [1,10,11]	
Energietechnologien, Materialien, Energieprodukte	<p><u>Ex ante:</u> Bio-/synth. Kraftstoffe: [1,12] RET: Marktanteile: [4,13–16] EET: Marktanteile: [1,4,13,17] EWT mit PtX, Speicher: [1,12,13] Mobilitätstechnologien: [1,4,10,13] Netztechnologien: [1,13] Hidden Champions: [1,4] Systemtechnologien, Sektorkopplung: [13] Materialien: [1,13]</p> <p><u>Ex post:</u> RET: Marktanteile, Patente, Exporte: [4,5,14–16] EET: Marktanteile, Patente Exporte: [4,5,16]</p>	synthetische Kraftstoffe, RET, EET, CCS: [1] neue/verbesserte Prozesse z. B. bei Stahl, Chemie, Zement: [1,12] CCT: [4,18] Sonstige Industrie: Co-Benefits über Recycling, Material-/Rohstoffeffizienz, Substitution, Nutzungsintensitäten, Reputation: [4,19,20]
	Vorleistungsverflechtungen, regionale Cluster: [38]	
	Zunahme heimischer Wertschöpfung	Prosumer: [21,22], Eigenproduktion, Unabhängigkeit
	Neue Geschäftsmodelle (überwiegend szenarienbasiert)	
Industrie	neue Kooperationen Netzbetreiber/ Versorger und Industrie: [23,24]	Agrarwirtschaft: „digital farming“, Doppelnutzungen, nachwachsende Rohstoffe: [1,25] Nutzung nachwachsende Rohstoffe: Biokunststoffe, Öle, Farben, Bioenergie, ...: [4]
Energiewirtschaft	Verknüpfung verschiedener Dienstleistungen/Geschäftsmodelle: [26–28] Stadtwerke: Kooperationen, Dienstleistungsmodelle: [24,29–31] Dezentral, kleine Akteure mit Speicher, Energieeinsparung, Landwirte und Bürger als Energieerzeuger: [32,33]	
Infrastrukturen mit neuen Akteuren	Bürgerbeteiligung, Investition der Kommunen: [31,34]	
Neue Akteure im Handel		EEl: Handel auf Reservemarkt (Strom), Abschaltbare Lasten, ETS-Handel [35]
Sektorübergreifend neue Geschäftsmodelle	Sektorkopplung: Strom, Wärme, Verkehr über PtX oder Elektrifizierung [10,11]	

Quelle: eigene Zusammenstellung. [1] = BCG & Prognos (2018). [2] = Löckener et al. (2016). [3] = Sievers & Pfaff (2016). [4] = BMU (2018). [5] = UBA (2016). [6] = Amelang (2018). [7] = European Commission (2017a). [8] = IRENA (2016). [9] = Duscha et al. (2014). [10] = Wietschel et al. (2018). [11] = Wietschel et al. (2017). [12] = Eurelectric (2018). [13] = Hoffmann et al. (2014). [14] = Pegels & Lütkenhorst (2014). [15] = Observ'ER et al. (2018). [16] = UBA (2018a). [17] = Rennings & Rexhäuser (2014). [18] = Fleiter, Rehfeldt & Pfluger (2016). [19] = Hennicke (2015). [20] = International Energy Agency (2014). [21] = Aretz, Bost & Hirschl (2016). [22] = Klemisch & Boddenberg (2016). [23] = Khripko et al. (2017). [24] = Kim et al. (2018). [25] = Rösch (2016). [26] = Burger & Luke (2017). [27] = energypost (2017). [28] = Midttun & Piccini (2017). [29] = Dyck, Hirschfeld & Tschense (2016). [30] = Berlo, Wagner & Drissen (2017). [31] = Schäfer (2017). [32] = Kemfert (2017). [33] = Parra et al. (2017). [34] = Gailing & Röhring (2015). [35] = Fraunhofer IEE (2018a). [37] = GWS, Prognos, EW (2014). [38] = Ulrich, Lehr & Lutz (2018)

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht und Zuordnung der im Weiteren ausgewerteten Literatur. Dabei wird die Literatur geclustert nach Beiträgen, die gesamtwirtschaftliche und sektorale Wachstumseffekte beschreiben, und nach Untersuchungen zu neuen Geschäftsmodellen in den folgenden Querschnittsbereichen: Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien (RET), Effizienztechnologien (EET), Energieumwandlungstechnologien (EWT), Querschnittstechnologien⁴ (CCT) und Klimaschutztechnologien/güter⁵ (CT).

Gesamtwirtschaftliche Wirkungsanalysen wurden bereits in der Einleitung beschrieben. Auf der Nachfrageseite entstehen jedoch gesamtwirtschaftliche Vorteile, die oftmals übersehen werden: Höhere Energieeffizienz führt in Unternehmen und Haushalten zu frei werdenden Mitteln, die weiteren Verwendungszwecken dienen können.

Neue Produkte führen zu neuen Produktionsanforderungen und Möglichkeiten. So kann die Energiewende auch als Teil einer gesamtwirtschaftlichen Modernisierungsstrategie begriffen werden. Offenkundiges Beispiel ist die Automobilindustrie, deren Chancen und Risiken in den letzten Jahren breit diskutiert worden sind. Aber auch die kleineren Veränderungen in der Produktpalette schaffen neue Möglichkeiten für regional stärkere Cluster oder Vorleistungsverbünde und heimische Wertschöpfung. Auf der Ebene der Energieverbraucher stellen sich mehr Möglichkeiten ein, die benötigte Energie selbst zu erzeugen, etwa den Strom durch eine PV-Anlage oder die Wärme durch Wärmepumpenanlagen oder Solarthermieranlagen, sowohl im Haushaltsbereich als auch in GHD oder Industrie.

Innovative Güter für die Energiewende stellen neue potentielle Absatzmärkte im In- und Ausland dar und eröffnen neue Gewinnmöglichkeiten. Für bestehende Unternehmen bietet sich die Möglichkeit, Teile ihres Portfolios zu modernisieren oder zu erweitern, neue Unternehmen können sich am Markt etablieren.

3.2 VERÄNDERUNGEN IN DER INDUSTRIE UND ENERGIEWIRTSCHAFT DURCH DIE ENERGIEWENDE

Der Strukturwandel der Wirtschaft umfasst auf aggregierter Ebene die Veränderungen der Bruttowertschöpfung zwischen den einzelnen Industrien/Sektoren (intersektoral) sowie Verschiebungen innerhalb einer Industrie oder Branche (intrasektoral), ohne dass die Produkte und Unternehmen im Einzelnen betrachtet werden.

Neue Geschäftsmodelle oder -bereiche umfassen dahingegen die Möglichkeiten bei den Technologieherstellern und speziellen Dienstleistern sowie deren vor- oder nachgelagerten Industrien, neue oder veränderte Produkte an den Markt zu bringen. Der Begriff Geschäftsmodell umschreibt hier ein „value proposition“ (Nutzenwert), wie dieser generiert wird und womit Einnahmen erzielt werden, und erstreckt sich auf neue

⁴ Pumpen, Ventilatoren, IT, Materialien

⁵ Sonstige CT: Technologien zur Minderung von Treibhausgasemissionen in der Produktion (Umwelt/Ressourceneffizienzprodukte, Materialwissenschaften). Insgesamt CT: übergeordneter Begriff für alle Technologien die Treibhausgasemissionen vermindern d.h. EET, RET, EWT, ...

Akteure, Unternehmen und Segmente sowie auf bestehende/reife Industrien mit ausdifferenzierten Geschäftsmodellen. Eine umfassendere Definition ist in UBA (2014a) zu finden.

3.2.1 STRUKTURWANDEL INTER- UND INTRASEKTORAL

Viele Studien zur Energiewende bzw. zum Klimawandel betrachten den intersektoralen Strukturwandel mit Blick auf Veränderungen der Bruttowertschöpfung und Beschäftigung, Investitionen oder Konsum. Hierbei werden die Veränderungen zwischen den einzelnen Sektoren oder Branchen quantitativ ex ante abgeschätzt (vgl. für einige Studien Lutz & Breitschopf 2016; Sievers & Pfaff 2016; UBA 2016; Duscha et al. 2014; IRENA 2016). Die Modellergebnisse zeigen deutliche Rückgänge der Wertschöpfung bei Bergbau, Mineralöl- und Kokereierzeugnissen oder Energiewirtschaft, bei Keramik und Metallen oder Baugewerbe hingegen einen Zuwachs (BCG & Prognos 2018; UBA 2016). Weitere Studien zeigen ähnliche Ergebnisse auf (z. B. European Commission 2016a, 2017a), auch auf regionaler Ebene. Für Baden-Württemberg sind positive Effekte bei Unternehmensdienstleistungen, Baugewerbe, Investitionsgüterindustrie, Metall- und Stahlindustrie zu erwarten (Löckener et al. 2016).

Eine Untersuchung für die Europäische Kommission (European Commission 2017a) findet intersektorale Veränderungen in der EU, gemessen durch die Veränderung bei den Beschäftigten und dem BIP. Der Bergbau weist zunehmend weniger Beschäftigte auf. Der Bausektor und der Maschinenbau zeigen deutlich steigende Beschäftigung. Alle anderen Sektoren gewinnen ebenfalls. Dies ist vor allem auf die weiter oben beschriebene sektorale Verflechtung zurückzuführen, die sich auch zwischen den EU-Ländern fortsetzt. Investitionen in Energiewende- oder Klimaschutzgüter erhöhen die Nachfrage nicht nur nach diesen Gütern, sondern auch nach Vorleistungen.

Letztlich treiben neue Querschnittsbranchen⁶ den Strukturwandel und er verläuft oftmals zunächst statistisch unentdeckt. Erst detaillierte Analysen, wie etwa zu den erneuerbaren Energien (Lehr et al. 2015; O’Sullivan, Edler & Lehr 2018) zeigen die ganze Breite der gesamtwirtschaftlichen Impulse via Vorleistungsverflechtung.

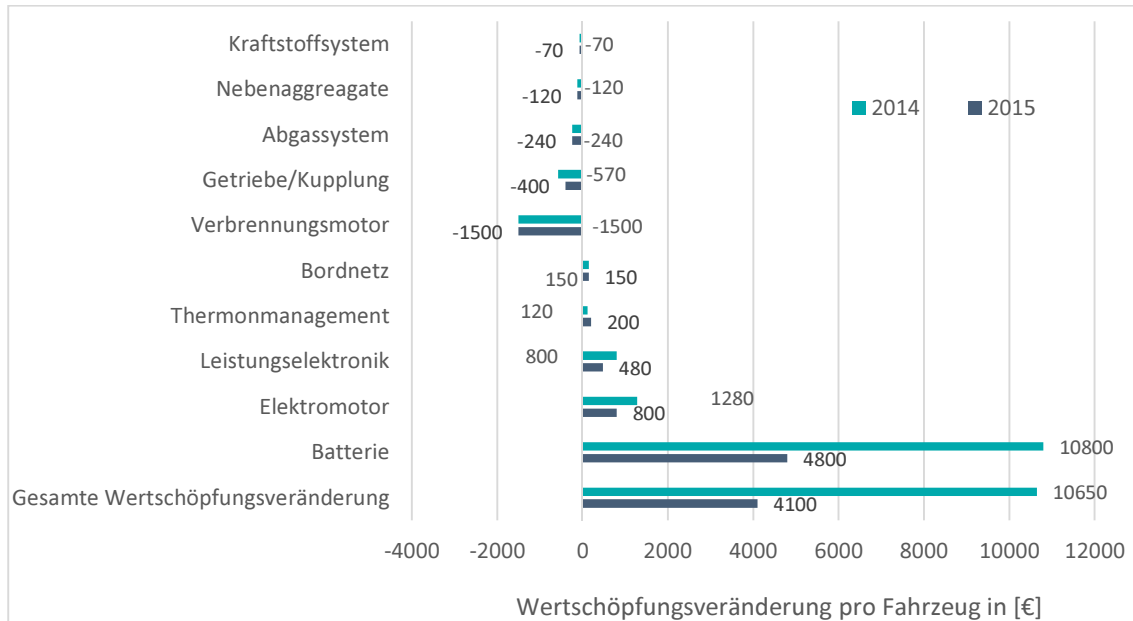
Ex-post-Betrachtungen zur Veränderung der Bruttowertschöpfung (Abbildung 13) entlang der Wertschöpfungskette der E-Mobilität zeigen, dass insbesondere die Bereiche Leistungselektronik, Elektromotor und Batterie durch die Energiewende profitieren (Wietschel et al. 2018).

Mit Blick auf die technologische Leistungsfähigkeit steht Japan bei den Patentanmeldungen an erster Stelle, insbesondere in der Leistungselektronik und Ladetechnologie, während Deutschland hier mit großem Abstand folgt, vor den USA, China und Korea (Wietschel et al. 2018). Ein möglicher Impuls der Energiewende auf Innovationsaktivitäten und somit auf Marktführung ist hier nur bedingt erkennbar. Allerdings sind Paten-

⁶ Branchen, die in der Statistikklassifikation nicht als ein Wz/eine Branche ausgewiesen bzw. definiert sind, sondern sich aus Technologien und Dienstleistungen verschiedener Branchen zusammensetzen, bspw. Erneuerbare Energien, E-mobilität, Energieeffizienz, Umwandlungstechnologien

te aufgrund unterschiedlicher Patentrechte, aber auch unterschiedlicher Patentkulturen nicht unbedingt eindeutig mit der Innovationskraft einer Branche verbunden.

Abbildung 13: Veränderung der Bruttowertschöpfung bei E-Mobilität nach Bereichen

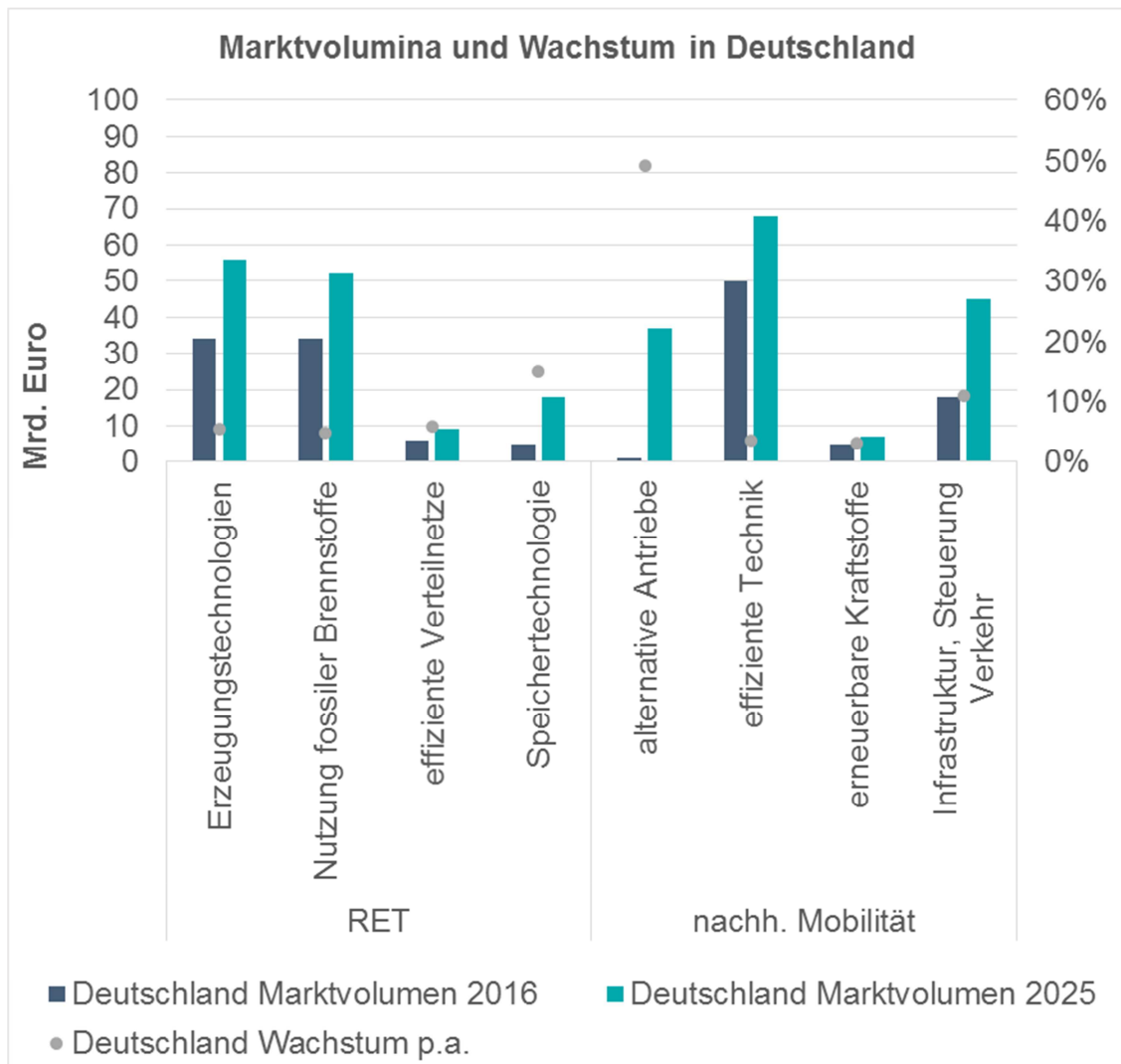


Quelle: Wietschel et al. (2018)

Insgesamt eröffnet die Energiewende für Unternehmen im Bereich von Klimaschutztechnologien (CT), Energieeffizienz- (EET), Energieumwandlungstechnologien (EWT) und Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien (RET) neue Marktchancen (BCG & Prognos 2018; Hoffmann et al. 2014). Ex-post-Untersuchungen zum Ausbau erneuerbarer Energien zeigen Wettbewerbsvorteile – gemessen in Form von Markt- oder Handelsanteilen – für deutsche Unternehmen, die im Bereich RET aktiv sind (Pegels & Lütkenhorst 2014; Observ'ER et al. 2018). Ähnliche Vorteile sind im Bereich der Effizienztechnologien zu erwarten (Rennings & Rexhäuser 2014). Als weitere Indikatoren zur Darstellung von Wettbewerbsfähigkeit dienen Patente in den jeweiligen Technologiefeldern (UBA 2014a).

Die Submärkte einer Transformation durch die Energiewende umfassen alternative Antriebstechnologien (Mobilität), RET, Speichertechnologien, EET und stoffliche Abfallverwertung, die sich über Marktattraktivität (Wachstum, Margen, Wettbewerb, Lead Markt) und Wettbewerbsposition (Markt- und Patentanteil, Standortfaktoren) charakterisieren lassen (UBA 2014a). Ähnliche Querschnittsindustrien wurden in BMU (2018) identifiziert. Daten zu Marktanteilen und Marktvolumina zeigen, dass in Deutschland GreenTech-Güter im Jahr 2016 einen Anteil von 15 % am BIP und einen globalen Handelsanteil von 14 % haben, wobei sich das Marktvolumen von rund 347 Millionen Euro auf die Bereiche Energieeffizienz, umweltfreundliche Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, Kreislaufwirtschaft, Rohstoff-/Materialeffizienz, nachhaltige Mobilität und Wasserwirtschaft erstreckt, die teils stark mittelständisch geprägt sind (BMU 2018). Viele mittelständische Unternehmen spielen mit ihren spezialisierten Nischenlösungen eine bedeutende Rolle am Weltmarkt – sie werden als „Hidden Champions“ bezeichnet (BMU 2018).

Abbildung 14: Überblick über Veränderung von Marktvolumen bei GreenTech-Produkten in Deutschland

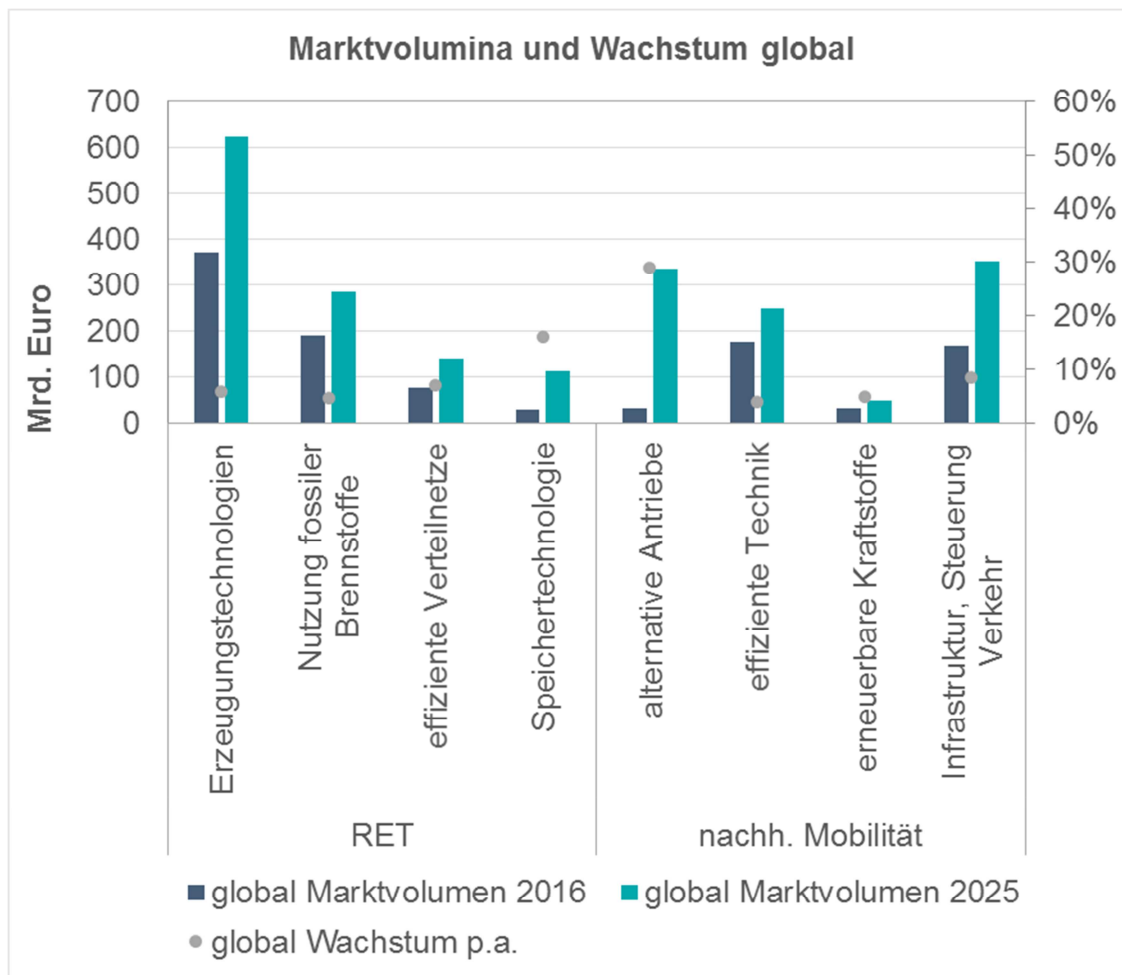


Quelle: eigene Darstellung basierend auf BMU (2018)

Quantitative Ex-ante-Schätzungen zur Entwicklung von Marktvolumina, Export- und Marktanteilen oder Mitarbeiterzahlen beruhen auf Annahmen zur zukünftigen Entwicklung, die sich aus der bisherigen Dynamik und Größe der Branche, neuen Technologieentwicklungen und Einschätzungen der Unternehmen ableiten lässt (z. B. BMU 2018). Sofern auf globaler Ebene die Nachfrage für diese Produkte wächst, kann im Allgemeinen eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende bzw. des Klimaschutzes zu einer Technologie- und Innovationsführerschaft Deutschlands bei diesen Zukunftstechnologien beitragen. Die größten Chancen sehen Studien bei Netztechnologien, Elektrofahrzeugen, Industrie 4.0, aber auch bei EET, EWT und Werkstoffherstellern (BCG & Prognos 2018). Das Wachstumspotenzial für GreenTech-Märkte wird global auf 6,9 % p. a. geschätzt, für Deutschland auf 8,78 % p. a. bis 2025, wobei bei RET nicht ganz mit einer Verdopplung des Marktvolumens von 2016 bis 2025 gerechnet wird, während EET als größter globaler Leitmarkt der GreenTech-Güter deutlich darüber liegt (BMU 2018). Insgesamt wird Systeminnovationen, die Technologien in die bestehenden Infrastrukturen, das soziale, institutionelle und ökonomische Umfeld in-

tegrieren, eine große Bedeutung zugeschrieben (Hoffmann et al. 2014). Dies trifft laut der Studie des BMU (2018) auch für den Bereich nachhaltige Mobilität – Infrastruktur und Steuerung Verkehr – zu. Die Marktvolumina 2016 und 2025 sind in Abbildung 14 für Deutschland und in Abbildung 15 für die Welt nach Wertschöpfungsbereichen von EET, RET und E-Mobilität dargestellt.

Abbildung 15: Überblick über Veränderung von Marktvolumen bei GreenTech-Produkten weltweit



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BMU (2018)

3.2.2 NEUE ODER VERÄNDERTE GESCHÄFTSMODELLE UND -FELDER

Neue Technologien, Prozesse und Dienstleistungen in Kombination mit neuen Akteuren, Nutzungsmöglichkeiten und -werten bieten einen großen Spielraum für neue Geschäftsmodelle. Neben Wettbewerbsvorteilen bei den Technologien entstehen auch neue Geschäftsfelder für Dienstleistungen in Kombination mit EET und RET, wie beispielsweise die Verknüpfung einer Dienstleistung mit einem Technologieprodukt („product as a service“) (BMU 2018).

Die Energiewirtschaft hat sich durch die Energiewende verändert und wird sich weiter verändern, da verschiedene Kombinationen aus Produkten und Dienstleistungen in neuen Geschäftsmodelle entstehen (UBA 2014a; Midttun & Piccini 2017). Sie wird kleinteiliger und dezentral, basierend auf einer Vernetzung von erneuerbaren, flexiblen

Speichern und Energieeinspartetechnologien (Kemfert 2017). Neue Akteure in der Erzeugung, wie beispielsweise Prosumer oder Genossenschaften, können auf kommunaler Ebene Netz-, System- und Vermarktungsdienstleistungen erbringen und werden immer mehr Teil des Energiesystems (Aretz, Bost & Hirschl 2016; Klemisch & Boddenberg 2016; Schill et al. 2016).

Die Nachfrage nach neuen Produkten wie Zertifikaten oder Power Purchase Agreement (PPA)⁷ mit grüner Energie eröffnen neue Märkte in der Energiewirtschaft (energypost 2017). Im Bereich Demand Response, Speicherung und PV-Stromerzeugung haben Burger & Luke (2017) über 140 verschiedene Firmen mit unterschiedlichen Geschäftsmodellen identifiziert. Sie umfassen Dienstleistungen wie dezentrale Erzeugung (z. B. Sungevity⁸), smart-home oder smart-grid, die mehrere Aufgaben auf einer Plattform zusammenfassen und individuelle Haushalte, wie z. B. Qivicon⁹ oder Techem¹⁰, oder entlang der gesamten Wertschöpfungskette in einem Paket Erzeuger, Verteiler und Verbraucher adressieren, wie beispielsweise Kiwigrid¹¹ (Midttun & Piccini 2017). Die Ausgestaltung der Geschäftsmodelle wird eher durch Regulierung und Politiken als durch technologische Entwicklungen getrieben (Burger & Luke 2017).

Auch Re-Kommunalisierungen von Netzen und Erzeugern verändern die Strukturen in der Energiewirtschaft (Schäfer 2017). Kommunen können als Anbieter von Dienstleistungen und Energiespeichern auf regionaler Ebene an Bedeutung gewinnen (Parra et al. 2017). Für Stadtwerke besteht die Möglichkeit in einer verstärkten Kooperation (untereinander oder der mit Industrie), neue Energiedienstleistungsmodelle (Berlo, Wagner & Drissen 2017) oder Vertriebsprodukte zu entwickeln und Geschäftsfelder zu erschließen. Allerdings kämpfen sie in manchen Regionen mit der demographischen Entwicklung und haben mit Blick auf die Chancen durch die Energiewende keine langfristigen Entwicklungspläne (Dyck, Hitschfeld & Tschense 2016). In ländlichen Regionen können insbesondere Landwirte durch die Erzeugung von Biogas und Bedienung von regionalen Absatzmärkten (Pellets) von der Energiewende profitieren (Gailing & Röhring 2015), aber auch Bürger durch Beteiligung an Bürgerwindparks und Netzinfrastrukturen (Gailing und Röhring 2015). Sektorübergreifend bietet die Substitution von Kraft- und Brennstoffen durch elektrischen Strom weitere Geschäftsmodelle und Geschäftsbereiche in der Energiewirtschaft (Wietschel et al. 2018). Insgesamt wurden in den Jahren 2015 und 2016 im Green-Economy-Bereich über 36.000 Start-ups gegründet, wobei 40 % auf Energieeffizienz und 13 % auf erneuerbare Energien entfallen (Borderstep Institut 2018). Der Anteil der „Green Economy“-Start-up-Gründungen belief sich im Jahr 2016 auf rund 16 % aller Gründungen und lag somit etwas höher als 2015 (Borderstep Institut 2018) (siehe Abbildung 16).

⁷ Handel mit Zertifikaten oder Bündeln von PPA zur Refinanzierung von Investitionen.

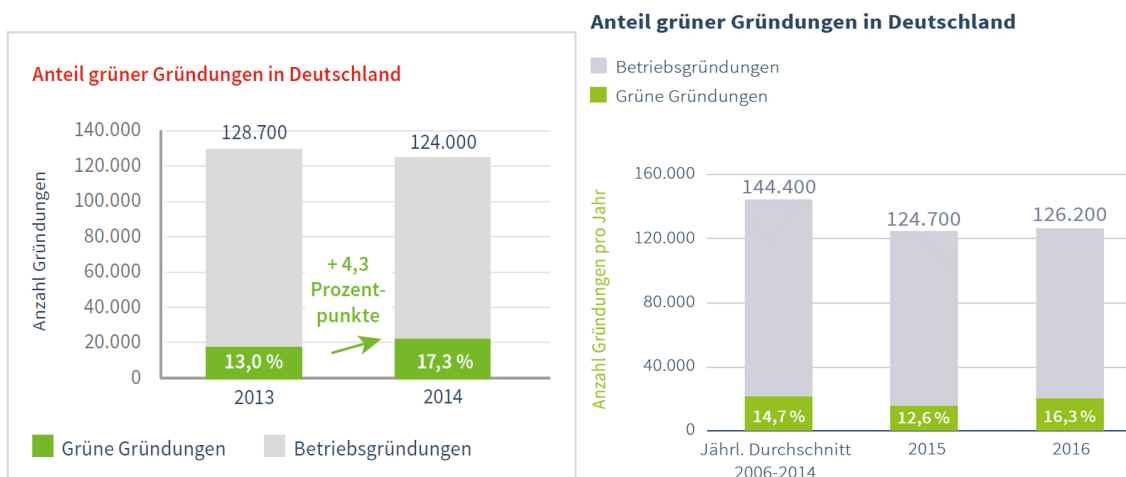
⁸ <http://www.sungevity.com/>

⁹ <https://www.qivicon.com/en/>

¹⁰ <https://www.techem.com/>

¹¹ <https://www.kiwigrid.com/portfolio/energy-iot-platform/>

Abbildung 16: Gründungen von Start-ups in Deutschland



Quellen: Borderstep Institut (2018 und 2016)

3.2.3 VORTEILE UND NEUE PERSPEKTIVEN FÜR DIE INDUSTRIE ALS ENERGIEKONSUMENT

Auf Verbraucherseite ergeben sich durch den Einsatz von Querschnittstechnologien zum Klimaschutz (CCT) Energieeinsparungen (BCG & Prognos 2018; Fleiter, Rehfeldt & Pfluger 2016), die letztendlich einen – vorübergehenden – Wettbewerbsvorteil¹² darstellen können. Neue Geschäftsmodelle im Bereich Demand Side Management (DSM) könnten die Interessen des Industriepartners und der Netzbetreiber integrieren (Khripko et al. 2017) und neue Einkommensquellen erschließen. Weitere Möglichkeiten zu Kooperationen oder neuen Geschäftsfeldern bietet die Kombination zwischen Industrien mit Wärmeabfall und Wärmenachfrage für Gebäude/Industrie (Kim et al. 2018). Darüber hinaus können Energieeinsparungen über verstärktes Recycling, geringeren Materialbedarf oder -substitution sowie intensivierete Nutzung zu weiteren Wettbewerbsvorteilen führen (Hennicke 2015). Weitere Studien (Trianni, Cagno & de Donatis 2014; Nehler & Rasmussen 2016; International Energy Agency 2014) führen ähnliche oder zusätzliche multiple, durch den Einsatz von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien bedingte Vorteile auf, die zu einer Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit führen können. Sie umfassen:

- Verminderter Einsatz von Material, Arbeit/Zeit, anderen Ressourcen, Operation & Maintenance und somit effizientere Produktion, bzw. höheren Output mit gleichen Ressourcen
- Bessere Produktqualität, verbessertes/neues Produkt

¹² Bei (global) signifikanten Energiepreisen oder Restriktionen in der Energieversorgung besteht ein Wettbewerbsvorteil durch energieeffiziente und flexible Produktion. Wenn andere Unternehmen/Länder ebenfalls in Energieeffizienz investieren, verliert sich dieser Vorteil in der Produktion. Allerdings besteht für die Energieeffizienzgüterhersteller in der Regel ein Wettbewerbsvorteil in der Herstellung ihrer Produkte (z.B. durch learning-by-doing, Skaleneffekte, Knowhow), wenn sie einen großen heimischen Markt bedienen können.

- Neuer Produktionsprozess
- Weniger Abfallstoffe, und weniger Nebenprodukte
- Höhere Arbeitssicherheit, Reduktion gesundheitlicher Risiken für Mitarbeiter z. B. durch Verminderung der Lärmemission
- Erfüllung bestimmter Mindeststandards, z. B. Emissionsstandards für Staub, Stickoxide etc.
- Bessere Reputation durch Produktqualität und Nachhaltigkeit bei der Produktion ggf. als Wettbewerbsvorteil

Studien, die diese Nebenwirkungen in ihrer Gesamtheit quantifizieren, sind jedoch nicht bekannt und eine Abschätzung dieser dürfte aufgrund der sehr hohen Abhängigkeit der Wirkungen von den durchgeführten Maßnahmen, eingesetzten Prozessen, Unternehmenscharakteristika und -strategien etc. sehr schwierig sein.

Zeitreihenbetrachtungen und Modellierungsergebnisse für die Bruttowertschöpfung deuten darauf hin, dass der Anteil der energieintensiven Industrien in Europa rückläufig ist und deren Wettbewerbsfähigkeit nur wenig durch Einführung von energieeffizienten Prozessen kompensiert werden kann (European Commission 2017a). Ihre Wettbewerbsvorteile liegen eher im Bereich der Qualität und Produktdifferenzierung (European Commission 2017a). Allerdings bietet die Energiewende gerade energieintensiven Industrien neue Geschäftsfelder, wie beispielsweise die Teilnahme am Reservemarkt über abschaltbare Lasten (Fraunhofer IEE 2018a).

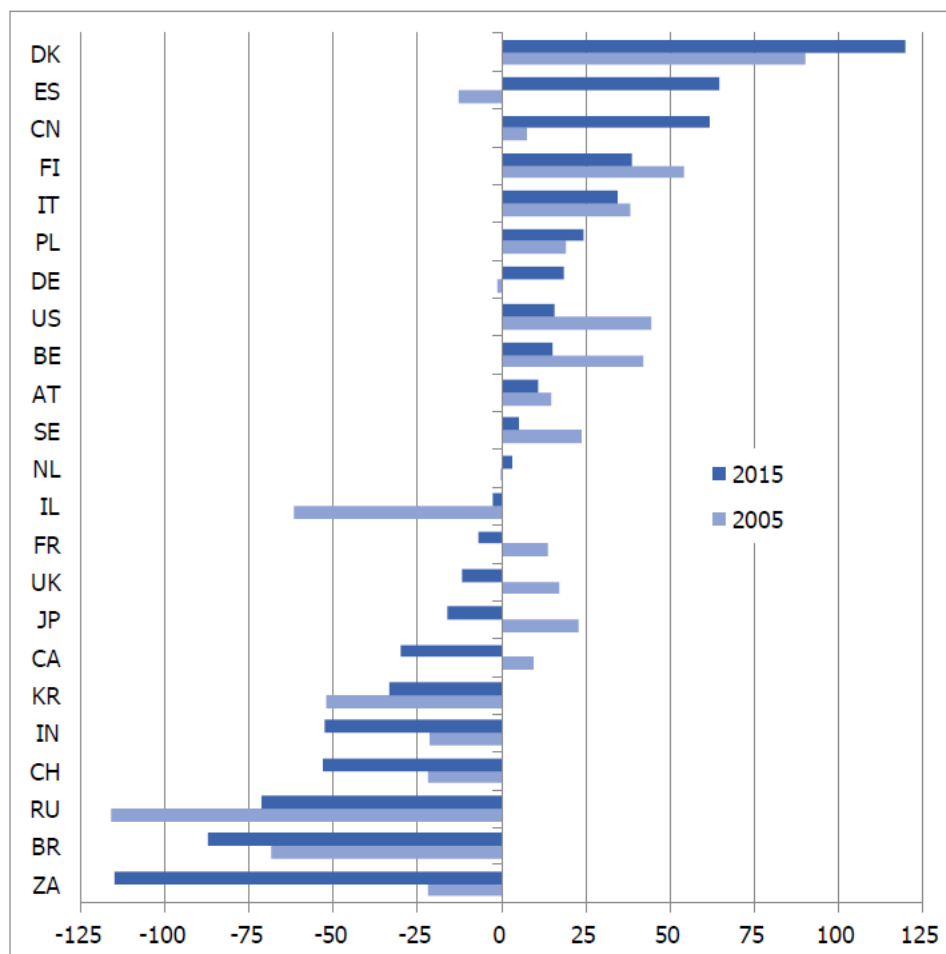
3.3 INNOVATIONEN ALS VORTEIL AUF DEN WELTMÄRKTEN

Die deutsche Industrie hat erkannt, dass die Energiewende und das politische Streben nach einer Dekarbonisierung der Volkswirtschaft wichtige Treiber für Innovationen und Modernisierung der Industrie darstellen und sich dadurch Chancen für (neue) Märkte im Bereich „clean technologies“ eröffnen (Amelang 2018). Wettbewerbsvorteile, oder auch Lead-Market-Positionen der Länder, die beispielsweise Energieeffizienz oder den Ausbau erneuerbarer Energien stark gefördert haben, werden bereits in International Energy Agency (2014) beschrieben und in UBA (2018a) empirisch erfasst. So werden ex post z. B. Patente oder Exporte von erneuerbaren Erzeugungstechnologien (RET) erhoben (Observ'ER et al. 2018; Ostertag et al. 2018; UBA 2018a). Intensive FuE-Bemühungen, so die Argumentation, führen zu technologischem Vorsprung und Innovationen und stärken so die Marktposition und die Wettbewerbsfähigkeit. Deutschland hält zwischen 2010 und 2014 zwischen 13 und 16 % der Patente bei Klimaschutztechnologien (CT) und knapp 15 % bei RE-Technologien (RET) (UBA 2018a). Geringere Anteile finden sich für die RE-Technologien (Observ'ER et al. 2018; Ostertag et al. 2018): Die EU hält 14 %, nach China und Japan, Deutschland rund 7 %, ebenfalls mit fallender Tendenz. Der Exportanteil für RET¹³ liegt bei rund 8 % für Deutschland sowie

¹³ RET: Exportanteil basierend auf monetär erfassten Exporten in der Handelsgruppe für PV, Turbinen (Wind-, Wasserkraft); zeigt den RET-Handel des jeweiligen Landes am globalen RET-Handel auf.

bei 23 % für die EU, während China einen Anteil von knapp 27 % aufweist. Allerdings divergieren diese Werte bei einer technologiespezifischen Betrachtung deutlich: Bei Wind weisen Dänemark (42 %), Deutschland (29 %) und Spanien (15 %) die höchsten Exporte auf, während im PV-Bereich China (33 %) mit großem Abstand dominiert (Observ'ER et al. 2018). Bei CT ist Deutschland nach China der größte Exporteur, knapp gefolgt von den USA, während bei der Außenhandelspezialisierung¹⁴ Deutschland im Gegensatz zu Dänemark zwar eine wachsende, aber keine ausgeprägte Spezialisierung für die CT aufweist (Ostertag et al. 2018) (siehe Abbildung 17). Dies bedeutet, dass der Handel Deutschlands mit anderen Gütern relativ groß ist, so dass der Anteil an den CT im Verhältnis dazu nicht stark ausgeprägt ist.

Abbildung 17: Außenhandelspezialisierung bei Klimaschutzgütern (CT)



RCA: Positives Vorzeichen bedeutet, dass die Export/Import-Relation bei potenziellen Klimaschutzgütern höher ist als bei Verarbeiteten Industriewaren insgesamt.

Quelle: UN COMTRADE-Datenbank. – Berechnungen des CWS

Quelle: Ostertag et al. (2018)

¹⁴ RCA: Revealed Comparative Advantage, zeigt den CT-Anteil eines Landes (CT-Anteil = gehandelte CT eines Landes/Welt am gesamten Handel mit Gütern eines Landes/Welt) in Relation zum globalen CT-Anteil.

Darüber hinaus definiert sich Wettbewerbsfähigkeit über Marktanteile, Marktvolumina bzw. Umsätze für „grüne“ Technologien, die ex ante abgeschätzt werden (z. B. in BMU 2018). Empirische Studien, die den Einfluss von Politiken auf die Wettbewerbsfähigkeit analysieren bzw. die kausalen Zusammenhänge näher untersuchen, deuten auf einen nur leicht positiven oder nicht-negativen Zusammenhang (UBA 2016). Untersuchungen zum Einfluss von Politikmaßnahmen im Bereich erneuerbarer Energien auf die Innovation bei Windkraft ergeben signifikante positive Ergebnisse (Schleich, Walz & Ragwitz 2017; Dechezleprêtre & Glachant 2014), die von einer anderen Studie gestützt werden, während für Solarstrom keine Signifikanz festzustellen ist (Wangler 2013). Weitere Analysen zu PV erlauben die Schlussfolgerung, dass Politikmaßnahmen wie Technologie- und Nachfrageförderung die Marktgröße beeinflussen und über Skaleneffekte zur Senkung der PV-Kosten beigetragen haben. Asiatische Hersteller konnten diese Skaleneffekte frühzeitig realisieren und haben nahezu alle anderen Hersteller verdrängt (Diekmann et al. 2016). Der Windenergiebereich hat sich diverser entwickelt, zum einen, weil die vielen Komponenten eine große Bandbreite an technischen Herausforderungen abdecken, und zum anderen, weil Teile einer Windkraftanlage wie die Flügel nur bedingt transportierbar sind. Eine räumliche Konzentration der Produktion findet daher viel weniger statt. So kann die Energiewende die technologische Leistungsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit (Lead-Markt-Position) der deutschen Windanlagenhersteller weiterhin erheblich unterstützen, wenn diese langfristig einen ausreichend großen Markt erwarten können.

4 BEITRÄGE ZUR ENERGIESICHERHEIT

Der in diesem Kapitel verwendete Begriff der Energiesicherheit geht auf den im englischen Sprachraum üblichen Begriff Energy Security zurück, der beispielsweise von der IEA¹⁵ definiert wird als „uninterrupted availability of energy sources at an affordable price. Energy security has many aspects: long-term energy security mainly deals with timely investments to supply energy in line with economic developments and environmental needs. On the other hand, short-term energy security focuses on the ability of the energy system to react promptly to sudden changes in the supply-demand balance.“ Hake und Rath-Nagel (2015) beschreiben die Energiesicherheit und den Zusammenhang zur ebenfalls breit diskutierten Energieversorgungssicherheit wie folgt. „Im traditionellen Sinne wird von Energieversorgungssicherheit (energy supply security) gesprochen, wenn die physikalischen oder technischen Bedingungen für eine jederzeit ausreichende Deckung der Nachfrage erfüllt sind. Daneben hat sich in den letzten Jahren der Begriff der Energiesicherheit als Teilaspekt der Rohstoffsicherheit etabliert, der in einem umfassenderen Maße einen Gleichgewichtszustand des Energiesystems beschreibt, bei dem ein auf Dauer angelegtes Stabilitätsziel erreicht wird.“ Energiesicherheit umfasst somit eine Vielzahl von Aspekten wie Verfügbarkeit, Zugänglichkeit, Umweltverträglichkeit und Erschwinglichkeit (APEREC 2007). Zu den Verfügbarkeitsfragen lassen sich im Bereich der fossilen Energieträger die Schätzung von Reserven und Ressourcen, die Beziehung zwischen Preisen für natürliche Ressourcen und wirtschaftlich lebensfähige Reserven und die Entwicklung von Regenerationstechnologien zählen (vgl. Eatherley & Morley 2008 oder Hetherington & Bloodworth 2008). Auch die Peak-Oil-Debatte, die sich mit dem Aufkommen unkonventioneller Öl- und Gasgewinnungsverfahren zunächst erledigt zu haben scheint, lässt sich hierzu rechnen (vgl. Tsoskounoglou, Ayerides & Tritopoulou 2008, Zhao, Feng & Hall 2009 oder de Castro, Miguel & Mediavia 2009). Zugänglichkeit oder Accessibility befasst sich mit technischen Fragen der Ressourcenextraktion, umfasst aber auch geopolitische und geostrategische Aspekte des Zugangs zu Ressourcen wie Ownership, Märkte, Oligopole und Eigentumsrechte (vgl. Eswaran & Lewis 1985).

Frühere empirische Untersuchungen betreffen Indikatoren wie bei Löschel, Moslener & Rübbelke (2009), Stirling (2009) oder Lehr (2009). Dort wird zunehmend der gesamte Energiemix unter dem Aspekt der Energiesicherheit diskutiert und nicht nur der Ölmarkt. Im Gegenteil: Ein diversifizierter Energiemix scheint in Bezug auf die Energiesicherheit an erster Stelle zu stehen. Der Ausbau erneuerbarer Energien und die Energiewende sind in dieser Betrachtungsweise durchaus positiv für die Energiesicherheit. Deutschland muss als rohstoffarmes Land einen erheblichen Teil seines Ressourceneinsatzes mit Importen bestreiten. Im Jahr 2016 wurden bspw. rund 93 Prozent der Steinkohle importiert. Der Importanteil von Gas lag im Jahr 2016 bei 93,8 Prozent und

¹⁵ <https://www.iea.org/topics/energysecurity/> zuletzt geprüft am 05.11.2018

von Rohöl bei 97,5 Prozent (BMWi 2018). Dabei stieg der Importanteil in den vergangenen zwei Jahrzehnten bei der Steinkohle durch den Ausstieg aus der heimischen Förderung an. Bei weitgehend konstanter inländischer Erzeugung beim Erdgas steigt auch der Importanteil mit dem Verbrauch. Diese Importabhängigkeit beinhaltet die Risiken durch Ausfälle von Lieferanten, Naturkatastrophen, aber auch durch die Abhängigkeit von starken Importpreisschwankungen. Diesen Risiken kann durch die Senkung des Rohstoffeinsatzes – hier des Energieeinsatzes – ebenso begegnet werden wie durch eine stärkere Diversifizierung der Energieträger. Wenn mehr heimische Energieträger eingesetzt werden, mindert dies die Abhängigkeit von Dritten.

Zur Messung der Verringerung von Energieimporten durch den Ausbau erneuerbarer Energien und die effizientere Nutzung von Energie ist von Lehr, Lutz & Becker (2018) ein Vorschlag unterbreitet worden. Dabei wird der Energieeinsatz mit einem hypothetischen Energieeinsatz verglichen, der nötig wäre, um heutige Leistungen (Produktion, Wertschöpfung, beheizte Fläche und Transportleistung) zu erbringen mit der Effizienz und dem Energieträgermix eines ausgesuchten Basisjahres. Der hypothetische Mehraufwand wird mit den entsprechenden Importquoten multipliziert und mit den entsprechenden Importpreisen bewertet. Lehr, Lutz & Becker (2018) finden Einsparungen im Vergleich zum Energiemix und der Effizienz im Jahr 2000 in der Größenordnung von 18 Mrd. Euro.

Erhöht das auch die Energiesicherheit? Unterstellt man, dass eine breitere Verteilung der Energieerzeugung auf viele, am besten heimische, Quellen vorteilhaft ist unter Sicherheitsgesichtspunkten, so lautet die Antwort: Ja. Dies gilt insbesondere für leistungsgebundene Energieträger wie Gas.

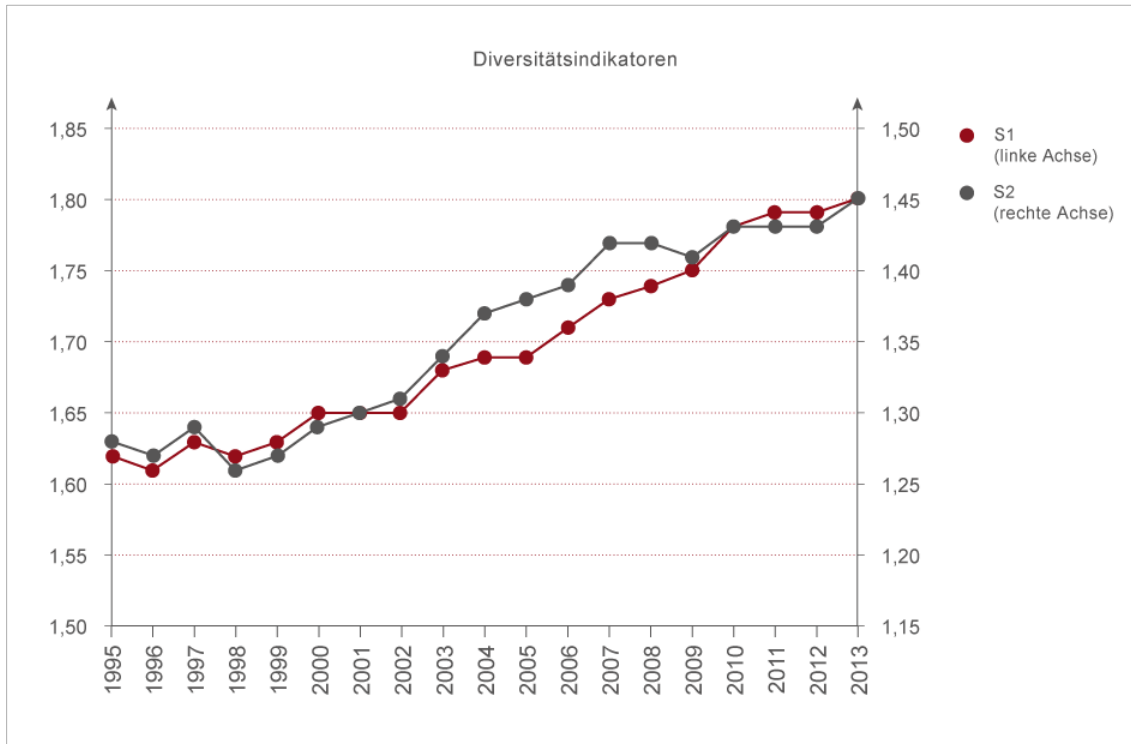
In Blazeczak et al. (2018) wird diese Antwort mittels Diversitätsindikatoren quantifiziert. Die Steigerung der Diversität des Energieangebotes ist dazu geeignet, die Energiesicherheit eines Landes zu erhöhen. Denn je vielfältiger sich die Versorgung darstellt, desto eher lässt sich der Ausfall einer Quelle (z. B. eines Energieträgers) kompensieren. Dabei bezieht sich die Diversität nicht nur auf die zur Energieerzeugung genutzten Energieträger (z. B. den Strommix), sondern ebenfalls auf die Anzahl der Länder, aus denen die benötigten Ressourcen stammen. Darüber hinaus beeinflussen die politischen, sozialen und gesellschaftlichen Verhältnisse der exportierenden Länder die Energiesicherheit in den importierenden Ländern, da der Bezug von Ressourcen aus politisch instabilen Ländern die Unsicherheit erhöht.

Im Kontext der Energiesicherheit wird oftmals der Shannon-Wiener-Index (S1 in Abbildung 18) gewählt, um die Diversität zu bestimmen und dadurch die Energiesicherheit zu quantifizieren. Hierbei handelt es sich um einen einfachen und robusten quantitativen Index (Lehr 2009). Dieser lässt sich um die Faktoren „Importabhängigkeit“ und „langfristige Stabilität der Importländer“ erweitern (S2). Zu beiden Indikatoren lässt sich der Idealwert bei absoluter Gleichverteilung von Importanteilen und Risiken bei gegebenen Herkunftsländern berechnen und dann die Entwicklung des Indikators gegenüber diesem Idealwert nachzeichnen.

Anhand der Diversitätsindizes lässt sich feststellen, dass die so abgebildete Versorgungssicherheit in Deutschland in den Jahren zwischen 2000 bis 2013 gestiegen ist. Da der Index u. a. auf der Verteilung der Primärenergieträger basiert, kann dies über-

wiegend durch den Ausbau der erneuerbaren Energien erklärt werden¹⁶, der zu einer vielfältigeren und gleichmäßigeren Verteilung der Energiebezugsquellen führte und dazu beitrug, – im Vergleich zu Energieimporten aus Ländern mit schlechter Länderrikklassifizierung – die Versorgungssicherheit in Deutschland zu erhöhen.

Abbildung 18: Entwicklung von Diversitätsindikatoren



Quelle: Blazejczak et al. (2018)

Drei weitere Aspekte werden in der Literatur (Tänzler et al. 2017) zunehmend im Zusammenhang von Energiewende und Energiesicherheit aufgegriffen:

- Welche neuen Risiken gibt es für das Energiesystem?
- Wie kann die Energiewende die Energiesicherheit weltweit erhöhen?
- Wie wird die Energiewende in der Bevölkerung unter Sicherheitsaspekten wahrgenommen?

Hake und Rath-Nagel (2016) definieren die Risiken für eine kritische Infrastruktur und prüfen, inwiefern diese durch die Energiewende gesenkt (oder erhöht) werden. Die Risiken sind

- technisches Versagen,
- Naturereignisse,
- militärische Konflikte,
- terroristische Anschläge und

¹⁶ Im Folgenden wird der Uranbrennstoff als importiert gewertet.

- digitale Disruption.

Als Maßnahmen zur Unterstützung eines gegen diese Störungen resilienteren Energiesystems schlagen sie vor:

- Diversifikation und Energieunabhängigkeit,
- Dezentralisierung,
- höchste Sicherheits-, Effizienz- und Umweltstandards,
- Dialog zwischen Produzenten und Konsumenten von Energie,
- Stabilisierung der Gesellschaft, vor allem Integration der Jugend: Jobs,
- polizeiliche und militärische Schutzmaßnahmen und
- Katastrophenschutz.

Pflüger (2013) geht an dieser Stelle mehr ins Detail und verbindet diese Maßnahmen mit einzelnen Aspekten der Energiewende. So trägt diese, wie bereits oben gezeigt, zur Diversifizierung der Energiequellen bei und führt über den dezentralen Charakter des Ausbaus erneuerbarer Energien zu mehr Resilienz. Hohe Umweltstandards helfen im Katastrophenfall vielleicht, Schlimmeres zu verhindern. Gerade die Energiebereitstellung muss allerhöchsten Standards genügen. Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 sind neue Stresstests für Kernkraftwerke auch in Deutschland durchgeführt worden.

Westphal (2012) schreibt bereits ein Jahr nach den Energiewendeentscheidungen über die weltweite Bedeutung, die das Gelingen der Energiewende für potentielle Nachahmer hat. Somit kann eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende zur Erhöhung der internationalen Energiesicherheit beitragen. Die weltweiten Herausforderungen beim Umbau der jeweiligen Energiesysteme sind durch stark wachsende Volkswirtschaften in Asien und zukünftig in Afrika und ihren Energiebedarf nur größer geworden, denn auch dieser Bedarf sollte durch eine klimaverträgliche Erzeugung gedeckt werden, wenn man das Paris-Abkommen und die Warnungen der Klimaexperten/-innen ernst nimmt. Daher schlägt Westphal (2012) eine Energiewende-Außenpolitik vor und fordert, die internationale Governance in dieser Hinsicht zu stärken.

Auch im Inland wird die Energiesicherheit in der öffentlichen Debatte zur Energiewende und in ihrer Kommunikation berücksichtigt. Trost, Büttgen & Geringhoff (2016) setzen sich mit den Deutungsmustern der Energiewende auf lokaler Ebene auseinander. Sie finden die Energiesicherheit im mittleren Feld unter den Top-Themen der Energiewendeberichterstattung, hinter den Kostenaspekten (EEG-Umlage, Netzausbau etc.) und vor der gesellschaftlichen Akzeptanz und den fossilen Energiepreisen. Wurde über die Nutzen der Energiewende in den NRW-Medien berichtet, so wurde der Zusammenhang zur Energiesicherheit sehr häufig mitkommuniziert.

5 WENIGER UMWELTKOSTEN

Durch die Energiewende werden Luftschadstoffemissionen reduziert, was Gesundheit und Wohlbefinden vieler Menschen verbessert. Neben den Gesundheitskosten und den vorzeitigen Todesfällen sind auch Ernteauffälle, Verluste an Natur und in der Biosphäre sowie Gebäudeschäden aufzuführen, die durch die Energiewende reduziert werden. Darüber hinaus verringern sich die Gefahren eines atomaren Unfalls oder weniger Lärm durch Verbrennungsmotoren entsteht.

Diese Wirkungen lassen sich konzeptionell den verringerten externen Effekten zuordnen. Als externer Effekt oder auch Externalität werden in der Volkswirtschaftslehre die unkompenzierten Auswirkungen ökonomischer Entscheidungen auf unbeteiligte Marktteilnehmer bezeichnet. Sie werden nicht in das Entscheidungskalkül des Verursachers einbezogen. Ein negativer externer Effekt ist eine Schädigung durch ökonomische Entscheidungen Dritter, welche nicht (ausreichend) kompensiert wird. Für den Energieeinsatz bedeutet dies u. a., dass dabei Schadstoffe emittiert werden, die Menschen, Natur oder Dinge vor Ort oder in weiterer Entfernung schädigen. Der Energienutzer trägt die Kosten nicht.

Allerdings stellt die Abhängigkeit der Schadenswirkungen vom Emissionsort, Höhe, Wirkungsdauer und Zeitpunkt der Emission monetäre Quantifizierungen dieser Verringerung negativer externer Effekte vor große Herausforderungen (UBA 2012). Wegen der teils komplexen Wirkungszusammenhänge haben sich große EU-Forschungsvorhaben zwischen Anfang der 90er-Jahre und 2009, wie insbesondere NEEDS¹⁷ und ExternE¹⁸, mit der Fragestellung der externen Kosten der Energiebereitstellung umfassend beschäftigt.

Im Verkehrsbereich werden solche Abschätzungen zu den externen Kosten in Form von Luftschadstoffen und Lärm bereits seit Langem genutzt, um entsprechende Referenzwerte für den Schwerlastverkehr in der EU zu ermitteln (Ricardo, DIW & CAU 2014). Regelmäßig aktualisierte Werte fließen in die jeweiligen EU-Richtlinien ein (European Commission 2017b und 2017c). Dort werden Höchstsätze für verschiedene Fahrzeugkategorien und Emissionsklassen benannt, an denen sich die EU-Staaten bei der nationalen Umsetzung orientieren können.

Methodisch folgt die Vorgehensweise Vorschlägen aus dem NEEDS-Projekt. Im Impact-Pathway Approach wird der Schaden – ausgehend von den Emissionen über ihre Verteilung und die Exposition der Bevölkerung – im Vergleich zu bestimmten Grenzwerten und der dadurch ausgelösten Wirkungen in monetäre Schäden umgerechnet (Ricardo, DIW & CAU 2014, S. 27).

¹⁷ <http://www.needs-project.org/>

¹⁸ http://www.externe.info/externe_d7/

Diese fließen in die Festlegung der Lkw-Maut in Deutschland bzw. in die Wegekostengutachten als Grundlage ein. Durch Änderung einer EU-Richtlinie konnten im Wegekostengutachten für die Jahre 2013 bis 2017 erstmals Kosten für die verkehrsbedingte Luftverschmutzung eingerechnet werden. Im Frühjahr 2018 wurde ein neues Wegekostengutachten für die Jahre 2018 bis 2022 veröffentlicht (Alfen, AVISO & BUNG 2018). Darin wird empfohlen, für Deutschland die vorgeschlagenen folgenden Höchstwerte zu verwenden. Für Fahrzeuge mit Euro-VI-Norm beträgt der Höchstsatz derzeit 1,1 ct₂₀₁₀/km auf Fernstraßen, für Fahrzeuge mit Euro 0 liegt der Höchstsatz bei 12,7 ct₂₀₁₀/km.

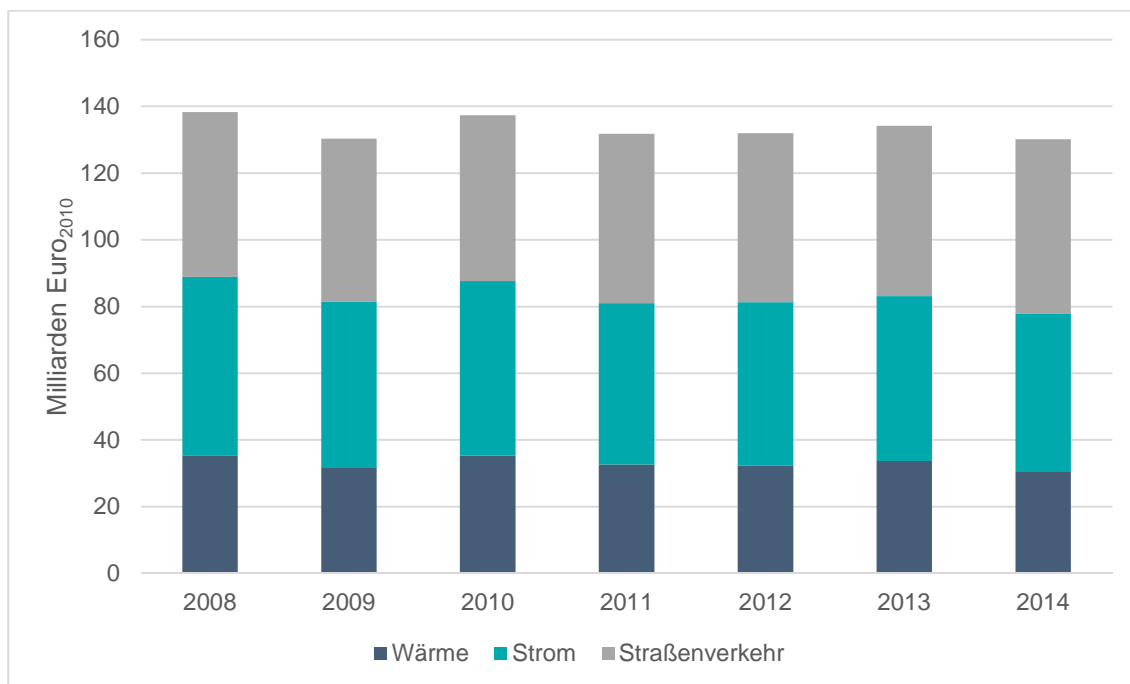
Tabelle 2: Höchstsätze für externe Kosten der Luftverschmutzung im Verkehr in ct₂₀₁₀/km (Anhang IIIb RL 2011/76/EU)

	Vorstadtstraßen (einschließlich Auto- bahnen)	Fernstraßen (einschließlich Auto- bahnen)
EURO 0	16,9	12,7
EURO I	11,7	8,5
EURO II	9,6	7,4
EURO III	7,4	6,4
EURO IV	4,3	3,2
EURO V	0	0
nach dem 31. Dezember 2013	3,2	2,2
EURO VI	0	0
nach dem 31. Dezember 2017	2,2	1,1
Umweltfreundlicher als EURO VI	0	0

Quelle: Alfen, AVISO & BUNG (2018)

Für den gesamten Energieeinsatz hat das Umweltbundesamt (UBA 2017a) die Umweltkosten durch Treibhausgase und Luftschadstoffe getrennt für die Strom- und Wärmeerzeugung sowie den Straßenverkehr berechnet. Der Indikator setzt sich aus den externen Kosten durch Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen zusammen, die durch Strom- und Wärmeerzeugung und Straßenverkehr entstehen. Das UBA berechnet die Größe selbst auf Basis von Angaben der AGEB, der AGEE-Stat, des BMWi und des Transportmodells TREMOD¹⁹. Für das Jahr 2014 betragen die Umweltkosten 130,1 Mrd. Euro. Der Teil, der dem Straßenverkehr zugerechnet wird, hat seit 2008 zugenommen, bei Strom und Wärme sind dagegen Rückgänge zu verzeichnen.

¹⁹ <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/tremod/>

Abbildung 19: Umweltkosten durch THG und Luftschadstoffe

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von UBA (2017a)

Grundlage für die Bewertung bilden die im Rahmen der Methodenkonvention 2.0 publizierten Best-Practice-Kostensätze (UBA 2012, 2014b), mit denen die Stromproduktion, der Endenergieverbrauch für Wärmeanwendungen und die Fahrleistung des Straßenverkehrs multipliziert werden. Sie werden für die Strom- und Wärmeerzeugung differenziert nach Kosten durch Luftschadstoffe und durch Treibhausgase angegeben, so dass eine getrennte Berechnung der Umweltkosten möglich ist. Bei Strom beträgt der Anteil der Luftschadstoffe an den Umweltkosten etwa 20 %, bei Wärme sind es rund 25 %. Eine Aktualisierung der Methodenkonvention und damit der Kostensätze wird derzeit im Auftrag des UBA durchgeführt (Fraunhofer ISI et al., in Bearbeitung). Die Ergebnisse sollen noch im Jahr 2018 veröffentlicht werden.

Tabelle 3 zeigt die Kostensätze für die Stromerzeugung durch Kohle, Erdgas und Erdöl sowie durch die erneuerbaren Energien durch Wasserkraft, Wind und Photovoltaik. Für die Bewertung der Schäden durch Kernenergie wird in der Methodenkonvention eine Bewertung mit dem höchsten Kostensatz empfohlen, d. h. in diesem Fall mit dem Kostensatz für Braunkohle.

Für die Bewertung von Biomasse wird in der Methodenkonvention lediglich ein Durchschnitt angegeben, der die Kostensätze für die einzelnen Arten der Biomasse nach ihren Erzeugungsanteilen gewichtet. Außerdem fehlen Kostensätze für die Stromerzeugung durch Geothermie. Differenzierte bzw. ergänzende Angaben liegen in einer Untersuchung des Fraunhofer ISI vor (Breitschopf 2012), die in Tabelle 4 dargestellt werden. Die Kostensätze werden pro erzeugter Kilowattstunde und in Preisen des Jahres 2010 ausgewiesen.

Tabelle 3: Kostensätze für die Umweltschäden infolge von Stromerzeugung (in ct₂₀₁₀/kWh)

	Luftschadstoffe	Treibhausgase	gesamt
Braunkohle	2,07	8,68	10,75
Steinkohle	1,55	7,38	8,94
Erdgas	1,02	3,90	4,91
Öl	2,41	5,65	8,06
EE: Wasserkraft	0,14	0,04	0,18
EE: Windenergie	0,17	0,09	0,26
EE: Photovoltaik	0,62	0,56	1,18

Quelle: UBA (2012)

Tabelle 4: Spezielle Kostensätze für Strom durch Geothermie und Biomasse (in ct₂₀₁₀/kWh)

	Luftschadstoffe	Treibhausgase	gesamt
EE: Geothermie	1,19	2,51	3,70
EE: Biomasse – fest	1,73	0,14	1,86
EE: Biomasse – flüssig	5,66	1,58	7,24
EE: Biomasse – Biogas	3,41	1,93	5,34
EE: Biomasse – Klär- / Deponiegas	3,01	0,48	3,49
EE: Biomasse – Biogener Abfallanteil	2,06	0,18	2,24

Quelle: Breitschopf (2012)

Die Differenzierung nach Luftschadstoffen und Treibhausgasen liegt auch bei den Kostensätzen für Wärmeerzeugung vor, welche in Tabelle 5 dargestellt werden.

Tabelle 5: Kostensätze für die Umweltschäden infolge von Wärmeerzeugung (in ct₂₀₁₀/kWh)

	Luftschadstoffe	Treibhausgase	gesamt
Heizöl	0,80	2,52	3,32
Erdgas	0,26	2,02	2,28
Braunkohle (Brikett)	2,74	3,43	6,17
Fernwärme mit Netzverlusten	0,88	2,60	3,48
Stromheizung mit Netzverlusten	1,14	5,15	6,29
EE: Solarthermie	0,54	0,55	1,10
EE: Oberflächengeothermie	0,39	1,75	2,13
EE: Biomasse	1,63	0,25	1,88

Quelle: UBA (2012)

Der Straßenverkehr verursacht neben Luftschadstoffen und THG-Emissionen weitere negative externe Effekte an Natur und Landschaft sowie in Form von Lärm. Daher ist bei diesen Umweltkosten keine simple Differenzierung nach Luftschadstoffen und Treibhausgasen möglich. Die Umweltschäden ergeben sich zum einen direkt aus dem Betrieb und zum anderen aus anderen Lebenszyklusphasen des Fahrzeugs, wie der Produktion, Wartung, Entsorgung und Bereitstellung der Kraftstoffe. Die Kostensätze ergeben sich somit in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps, wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Kostensätze für die Umweltschäden durch Straßenverkehr (in ct₂₀₁₀/Pkm bzw. ct₂₀₁₀/tkm)

	gesamt
PKW (Diesel)	4,0
PKW (Benzin)	3,1
LKW (LNF, Diesel)	16,2
LKW (LNF, Benzin)	12,1
LKW (SNF, Diesel)	2,4
Bus (Diesel)	2,2
Krafträder (Benzin, 4 Takt)	3,2
Krafträder (Benzin, 2 Takt)	3,3

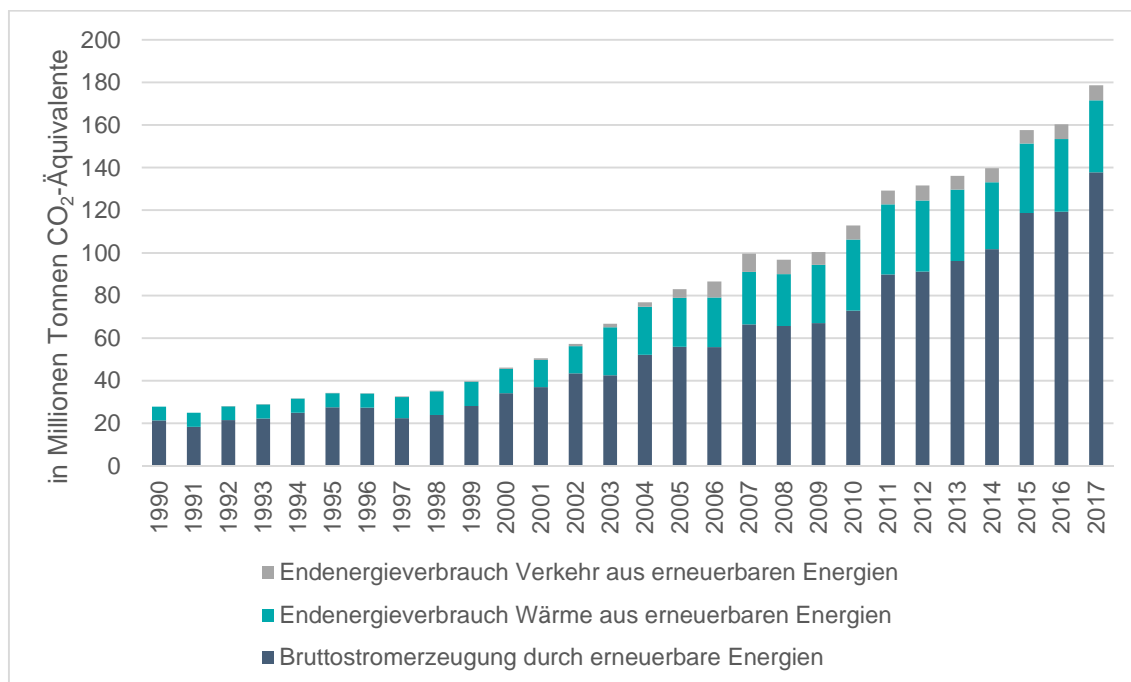
Quelle: UBA (2012)

Auf Basis der vom Umweltbundesamt ausgewiesenen Emissionsfaktoren können die durch den Ausbau erneuerbarer Energien bedingten vermiedenen Emissionen im Strom-, Wärme- und Verkehrsbereich jährlich abgeschätzt werden. Nach Berechnungen des UBA haben erneuerbare Energieträger im Jahr 2017 THG-Emissionen in Höhe von 178,6 Mt vermieden (UBA 2018b). Das Berechnungsverfahren wird ausführlich in UBA (2017b) dargestellt.

Eine Abschätzung der durch Effizienzmaßnahmen vermiedenen Emissionen erfordert zunächst die Definition der Einsparung, die Zuordnung zu Energieträgern und eventuell eine Zuordnung zu den Einzelmaßnahmen. Eine Effizienzsteigerung lässt sich so definieren, dass man entweder denselben Output mit weniger Input generiert oder mehr Output mit demselben Input. Auf die Energieeffizienz übertragen heißt dies, dass gesamtwirtschaftlich das gleiche BIP mit weniger Energieeinsatz generiert wird, bzw. auf einzelne Sektoren bezogen, dass der gleiche Transport mit weniger Energieeinsatz geleistet werden kann oder die gleiche Wohnfläche beheizt werden kann. Diese Definition beinhaltet das Festlegen eines Referenzpunkts. Typischerweise wird ein früheres Jahr gewählt. Die durch Effizienz vermiedenen negativen externen Effekte werden quantifiziert, indem man die Energieeinsparungen gegenüber einem hypothetischen Verbrauch, der notwendig wäre, um beispielsweise das heutige BIP mit der Energieeffizienz des Jahres 1995 zu erwirtschaften, mit Emissionsfaktoren und Schadenskosten bewertet. Für CO₂ wurde diese Quantifizierung in Blazeczak et al. (2018) vorgelegt. Dabei wird mit 80 Euro₂₀₁₀/t CO₂ bewertet und mit zwei Prozent pro Jahr deflationiert (UBA 2014b). Gegenüber der Effizienz aus dem Jahr 1995 werden durch verringerte

Emissionen aus dem Industriesektor Schäden in Höhe von 5,8 Mrd. Euro vermieden; aus dem Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen ergeben sich vermiedene Schäden in Höhe von 4,7 Mrd. Euro, für die Haushalte ergeben sich 4,3 Mrd. Euro. In Summe wurden Schäden in Höhe von 14,8 Milliarden Euro dadurch vermieden, dass die Energieeffizienz im Jahr 2013 deutlich höher ist als im Jahr 1995. Bei entsprechenden Zurechnungen sind autonomer und politikgetriebener Effizienzfortschritt oft nicht exakt zu trennen.

Abbildung 20: Vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von UBA (2018b)

Neben diesen Berechnungen werden in einigen internationalen Studien Emissionen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene abgeschätzt, wie beispielsweise in European Commission (2014, 2016a, 2016b), Kitous et al. (2016), Enerdata (2014) und IRENA (2018a), sowie die damit verbunden vermiedenen Gesundheitskosten ausgewiesen, z. B. Enerdata (2014), European Commission (2014), IEA (2014) und IRENA (2018b). Allerdings sind bei diesen Abschätzungen aggregierte Werte ohne Differenzierung nach Art der Luftschadstoffe, Region oder des Sektors für 2030 ausgewiesen. Generell stellte die Abhängigkeit der Schadenswirkungen vom Emissionsort, Höhe, Wirkungs-dauer und Zeitpunkt der Emission monetäre Quantifizierungen vor große Herausforderungen (UBA 2012).

6 FAZIT

Die Energiewende bringt weitere Vorteile jenseits von Beschäftigung und BIP mit sich, die teilweise nur schwer quantitativ und monetär zu erfassen sind. Manchmal erschließt sich der Zusammenhang mit der Energiewende dabei nicht auf den ersten Blick. Diese positiven Effekte liefern zusätzliche Argumente pro Energiewende.

So haben die Veränderung der Energieerzeugungsstruktur sowie des Energieverbrauchs und seiner Struktur teilweise tiefgreifende Änderungen auf Produktionsprozesse und mögliche Gewinne und Kosten in der Industrie, sodass man hier vom Strukturwandel durch die Energiewende sprechen kann. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit vieler Unternehmen hängt davon ab, dass sie die neuen Technologien auf dem Heimatmarkt entwickelt und erprobt haben. Es entstehen dabei neue Geschäftsmodelle und -felder. Die Energiewende ist somit Teil einer umfassenden und kontinuierlichen Modernisierung und Strukturveränderung der Volkswirtschaft.

Energie ist ein zentraler Wirtschaftsfaktor und beeinflusst die Produktionsweise, die Kosten von Haushalten und Unternehmen ebenso wie die Forschungs- und Innovationsaktivitäten. Die umfassende Transformation, die die Energiewende leisten soll, hat daher vielfältige Auswirkungen auf die Wirtschaftsstruktur. Der hier vorgelegte kurze Literaturüberblick kommt zu dem Fazit, dass die meisten Publikationen sich einig sind in der Einschätzung der Richtung der gesamtwirtschaftlichen Effekte durch die Energiewende in Deutschland oder einer vergleichbaren Transformation in der EU. Diese Richtung ist positiv, d. h. die Bilanz weist ein Mehr an Wirtschaftsleistung und Beschäftigung gegenüber einem Szenario ohne diese Transformationen auf. Im Einzelnen zeigen sich die Herausforderungen auf der Ebene der Sektoren: Wird es der Automobilbranche in Europa gelingen, einen erfolgreichen Kurs beim Übergang zur E-Mobilität zu fahren? Wie sieht die digitale Infrastruktur für virtuelle Kraftwerke aus und wer stellt sie bereit? Grundsätzlich weist die deutsche Wirtschaft in den Sektoren, die diesen zukünftigen Herausforderungen begegnen können, derzeit gute Werte auf. Flankierende Maßnahmen sind das verlässliche Bekenntnis zu den internationalen Zielen und den Zielen der Energiewende, die Qualifikation von Fachkräften und die Schaffung eines Regulierungs- und Finanzierungsrahmens, der neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zulässt und unterstützt.

Als externer Effekt oder auch Externalität werden in der Volkswirtschaftslehre die unkompenzierten Auswirkungen ökonomischer Entscheidungen auf unbeteiligte Marktteilnehmer bezeichnet. Für den Energieeinsatz bedeutet dies u. a., dass dabei Schadstoffe emittiert werden, die Menschen, Natur oder Dinge vor Ort oder in weiterer Entfernung schädigen. Der Energienutzer trägt die Kosten nicht. Durch die Energiewende werden Luftschadstoffemissionen reduziert, was Gesundheit und Wohlbefinden vieler Menschen verbessert. Monetäre Berechnungen der vermiedenen externen Effekte stehen wegen der komplexen Zusammenhänge von Ort, Höhe, Wirkungsdauer und Zeitpunkt der Emission vor großen Herausforderungen. Grundsätzlich sind die methodischen Probleme aber durchaus pragmatisch lösbar. Die Berechnungen geben wich-

tige Hinweise auf die Größenordnungen der externen Effekte und ihre Veränderung über die Zeit. Im Verkehrsbereich werden z. B. Abschätzungen zu den externen Kosten in Form von Luftschadstoffen und Lärm bereits seit Langem genutzt, um entsprechende Referenzwerte für den Schwerlastverkehr in der EU zu ermitteln. Wichtig für die umfassende Bewertung der Energiewende bleiben unabhängig von den Berechnungsmethoden und -herausforderungen die Vermeidung externer Effekte und die Berücksichtigung der damit verbundenen Vorteile für den Wohlstand.

Die Kosten der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Ressourcen verringern sich mit zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energien. Dies ist zum einen auf technologische Weiterentwicklungen zurückzuführen, die zu einer höheren Erzeugungseffizienz führen, aber auch auf neue Materialien, die teure bisher genutzte Materialien ersetzen. Darüber hinaus führen Skaleneffekte, „learning by doing“ sowie eine höhere Effizienz bei der Herstellung der Erzeugungstechnologien (Automatisation) zu fallenden Herstellungskosten. Letztendlich spielt auch der zunehmende Wettbewerb auf den Technologie(hersteller)märkten eine Rolle, die sich bei der PV-Modulherstellung zeigte. Langfristig tragen diese fallenden Technologiekosten auch zu bezahlbaren und wettbewerbsfähigen Energiepreisen bei, da sich zum einen die Umlagen für Erneuerbare aufgrund der Technologiekostensenkung vermindern. Darüber hinaus führen die geringen variablen Erzeugungskosten bei erneuerbaren Technologien zu günstigen Börsenspreisen.

Die Energiesicherheit gewinnt durch Diversifizierung. Nicht nur im Bereich der Herkunftsländer gilt dies für importierte Energieträger, sondern auch in technologischer Hinsicht, da Diversität eine Absicherung gegen Ausfälle einer Technologie darstellen kann. So ist ein diversifizierter Kraftwerkspark weniger anfällig gegen Hitze oder andere Extremwetterereignisse, räumlich aufgelöstere Strukturen sind resilienter als zentrale Strukturen mit konzentrierter Strom oder Wärmeerzeugung.

Die hier zusammengefassten Vorteile der Energiewende lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Qualität und Quantifizierbarkeit, aber auch aufgrund verschiedener zeitlicher Skalen, auf denen diese Vorteile anfallen, nicht zu einer einzigen Kennzahl zusammenfassen. Gäbe es diese Kennzahl jedoch, wäre sie vor allem positiv und würde die Vorteilhaftigkeit der Transformation zu einer nachhaltigeren Energieversorgung deutlich aufzeigen.

7 LITERATUR

- AGEE-Stat (2018): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.
- Alfen, AVISO & BUNG (2018): Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Weimar, Leipzig, Aachen, Münster, Köln.
- Amelang, S. (2018): German industry embraces Energiewende transformation challenge. URL: <https://www.cleanenergywire.org/dossiers/energy-transitions-effects-economy> [abgerufen am 27.08.2018].
- Aretz, A., Bost, M. & Hirschl, B. (2016): Prosumer für die Energiewende. In: ÖW 31 (2), S. 14. DOI: 10.14512/OEW310214.
- APERC (2007): A Quest for Energy Security in the 21st Century.
- Bach, S., Harnisch, M. & Isaak, N. (2018): Verteilungswirkungen der Energiepolitik – Personelle Einkommensverteilung. Studie im Auftrag des BMWi, Berlin (unveröffentlicht).
- BCG & Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. Im Auftrag des BDI.
- Berlo, K., Wagner, O. & Drissen, I. (2017): Strategische Optionen der Ruhrgebiets-Stadtwerke im Rahmen der Energiewende: Beurteilung der aktuellen Situation.
- Blättel-Mink, B. & Ebner, A. (Hg.) (2009): Innovationssysteme. Technologie, Institutionen und die Dynamik der Wettbewerbsfähigkeit. 1. Auflage, Wiesbaden.
- Blazejczak, J., Edler, D., Kahlenborn, W., Bacher, K., Linsenmeier, M., Oehlmann, M., Lehr, U., Lutz, C., Nieters, A., Flaute, M., Büchele, R. & Wolgam, G. (2018): Der Status quo. Wirtschaftliche Chancen durch den Klimaschutz. UFOPLAN-Vorhaben 3715 14 1060. Gefördert durch das Umweltbundesamt (UBA). Berlin, Osnabrück, München.
- BMU & BDI (2012): Memorandum für eine Green Economy. Eine gemeinsame Initiative des BDI und BMU.
- BMU (Hg.) (2018): GreenTech made in Germany 2018. Umwelttechnik-Atlas für Deutschland.
- BMWi (2017): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2016. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- BMWi (2018): Gesamtausgabe der Energiedaten. Datensammlung des BMWi.
- BNEF (2018): Beyond the Tipping Point. Flexibility gaps in future high-renewable energy systems in the UK, Germany and Nordics.

- Borderstep Institut (Hg.) (2016): Green Economy: Gründungsmonitor 2015. Entwicklung grüner Gründungen in Deutschland und im europäischen Vergleich.
- Borderstep Institut (Hg.) (2018): Green Economy: Gründungsmonitor 2017. Entwicklung und Finanzierung grüner Gründungen in Deutschland.
- Breitschopf, B. (2012): Ermittlung vermiedener Umweltschäden – Hintergrundpapier zur Methodik. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Projekts „Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien“.
- Breitschopf, B. (2016): Impact of RE Policy on Technology Costs-PV System Costs in Germany. In: IAEE Energy Forum, Bergen Special 2016, S. 41–43.
- Breitschopf, B., Wachsmuth, J., Schubert, T., Ragwitz, M. & Schleich, J. (2016): Prices and Costs of EU Energy. Annex 2 – Econometrics.
- BSW (2018): Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie), https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/bsw_faktenblatt_st_2018_2.pdf, BSW Faktenblatt 2/2018.
- Burger, S. P. & Luke, M. (2017): Business models for distributed energy resources. A review and empirical analysis. In: Energy Policy 109, S. 230–248. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.07.007.
- BWP (2018): Entwicklung der Absatzzahlen bei Wärmepumpen. URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen/> [abgerufen am 04.09.2018].
- Cheung, Albert (2018): Power Markets Today. BNEF, 14.06.2018. URL: <http://www.meti.go.jp/press/2018/05/20180529003/20180529003-2.pdf> [abgerufen am 22.08.2018].
- Cludius, J., Hermann, H., Matthes, F. C. & Graichen, V. (2014): The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008–2016. Estimation and distributional implications. In: Energy Economics 44, S. 302–313. DOI: 10.1016/j.eneco.2014.04.020.
- Curry, C. (2017): Lithium-ion battery costs & market. URL: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf> [abgerufen am 22.08.2018].
- dalla Longa, F. (2015): Global RES-E developments and technological learning. IEE project. Towards 2030 (Issue Paper No 12). URL: <http://towards2030.eu/sites/default/files/Towards2030-dialogue%20Issue%20Paper%20on%20Global%20RES%20and%20Technology%20Learning%20-%20Issue%20Paper%20%2312.pdf> [abgerufen am 12.03.2018].
- de Castro, C., Miguel, L. & Mediavia, M. (2009): The role of non conventional oil in the attenuation of peak oil. Energy Policy, May 2009, vol. 37(5), pp. 1825–1833.
- DEA (2016): Technology Data for Individual Heating Plants and Energy Transport, Updated chapters. Danish Energy Agency, Copenhagen.

- Dechezleprêtre, A. & Glachant, M. (2014): Does Foreign Environmental Policy Influence Domestic Innovation? Evidence from the Wind Industry. In: *Environ Resource Econ* 58 (3), S. 391–413. DOI: 10.1007/s10640-013-9705-4.
- Diekmann, J., Schill, W.-P., Breitschopf, B., Sievers, L., Klobasa, M., Lehr, U. & Horst, J., (2016): Impacts of Renewable Energy Deployment – Summary and Conclusions. Final report in the framework of the project “Impacts of Renewable Energy Sources (ImpRES)” supported by the Federal Ministry of Economics and Energy. URL: <http://www.impres-projekt.de/impres-en/content/abschlussworkshop.php> [abgerufen am 27.08.2018].
- Duscha, V., Ragwitz, M., Breitschopf, B., Schade, W., Walz, R., Pfaff, M., de Visser, E., Resch, G., Nathani, C., Zagamé, P., Fougeyrollas, A. & Boitier, B. (2014): Employment and growth effects of sustainable energies in the European Union: Final Report to Contract no.: ENER/C1/428-2012, Karlsruhe.
- Dyck, A., Hitschfeld, U. & Tschense, H. (2016): Energiewende in Mitteldeutschland: Wirtschafts- und strukturpolitische Implikationen.
- Eatherley, D. & Morley, N. (2008): Material Security: Ensuring Resource Availability for the UK, Economy, C-Tech Innovation Ltd.
- Enerdata (Hg.) (2014): Costs and Benefits to EU Member States of 2030 Climate and Energy Targets. URL: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/285505/costs_benefits_eu_states_2030_climate_and_energy_targets_enerdata_report.pdf [abgerufen am 19.02.2018].
- energypost (2017): How to ensure that corporate buying of renewable energy really makes a difference. URL: <http://energypost.eu/how-to-ensure-that-corporate-buying-of-renewable-energy-really-makes-a-difference-it-doesnt-always-do-so-now/> [abgerufen am 11.07.2018].
- Eswaran, M. & Lewis, T. (1985): Exhaustible Resources and Alternative Equilibrium Concepts. *The Canadian Journal of Economics / Revue canadienne d'Economie*, Vol. 18(3), pp. 459–473.
- Eurelectric (2018): Decarbonization pathways. European economy: EU electrification and decarbonization scenario modelling. Synthesis of key findings. URL: <https://www.energinorge.no/contentassets/bbdf49e19f04c5c8b8b1d3cf6377d85/decarbonisation-pathways-electrificatino-part-study-results-h-ad171ccc.pdf> [abgerufen am 27.08.2018].
- European Commission (2014): Impact assessment accompanying the communication. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030. European Commission (SWD(2014) 15 final). URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014SC0015&from=EN> [abgerufen am 19.02.2018].
- European Commission (2016a): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency. URL:

[http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016SC0405R\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016SC0405R(01))
[abgerufen am 19.02.2018].

European Commission (Hg.) (2016b): EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050.

European Commission (Hg.) (2017a): The Macroeconomic and sectoral impacts of Energy Efficiency. URL:
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/the_macro-level_and_sectoral_impacts_of_energy_efficiency_policies.pdf [abgerufen am 05.07.2018].

European Commission (2017b). Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures, COM(2017) 275 final. URL:
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/EN/COM-2017-275-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF> [abgerufen am 19.07.2018].

European Commission (2017c). Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures, COM(2017) 275 final, Annex 1. URL:
https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/com20170275-directive-eurovignette_infrastructure-annex.pdf [abgerufen am 19.07.2018].

Eurostat (2018a): Elektrizitätspreiskomponenten für Haushaltskunde. URL:
https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg_pc_204_c [abgerufen am 04.09.2018].

Eurostat (2018b): Elektrizitätskomponenten für Nichthaushaltskunde. URL:
https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg_pc_205_c [abgerufen am 04.09.2018].

Fleiter, T., Rehfeldt, M. & Pfluger, B. (2016): A transition pathway for Germany's industry: Which role for energy efficiency?: ECEE industrial summer study proceedings.

Fourastié, J. (1954): Die große Hoffnung des zwanzigsten Jahrhunderts. Köln.

Fraunhofer IEE (Hg.) (2018a): Kassler Symposium: Geschäftsmodell Energiewende. Kassel.

Fraunhofer IEE (2018b): Windenergie Report Deutschland 2017. Stuttgart.

Fraunhofer IEE (Hg.) (2018c): Windmonitor. URL:
http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/2_technik/2_leistungsklasse/ [abgerufen am 22.08.2018].

Fraunhofer ISE (2018): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. URL:
www.pv-fakten.de [abgerufen am 22.08.2018].

Fraunhofer ISI, EEG, Ecofys, eclareon, NTUA, CEPS, LEI, DIW, UU & Axpo (2016): Policy Dialogue on the Assessment and Convergence of RES Policy in EU Member States. Final Report.

- Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Energy Economics Group, Comillas, ISE, Prognos, & ECN (2014): Estimating energy system costs of sectoral RES and EE targets in the context of energy and climate targets for 2030. Report. Federal Ministry of Economic Affairs and Energy. URL: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/en/projects/REScost2030-Background-Report-10-2014_clean.pdf [abgerufen am 19.02.2018].
- Fraunhofer ISI, GWS, IZES & DIW (2015): Monitoring der Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien im Jahr 2014 (Monitoring of costs and benefits of RET deployment). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Fraunhofer ISI, INFRAS, CE Delft, HELMHOLTZ-Zentrum für Umweltforschung & KIT-EIFER (in Bearbeitung): Methodenkonvention 3.0: Weiterentwicklung und Erweiterung der Methodenkonvention zur Schätzung von Umweltkosten. Projekt im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- FS-UNEP & BNEF (2018): Global Trends in Renewable Energy Investment 2018. Frankfurt am Main.
- Gailing, L. & Röhring, A. (2015): Was ist dezentral an der Energiewende? Infrastrukturen erneuerbarer Energien als Herausforderungen und Chancen für ländliche Räume. In: Raumforschung und Raumordnung, 73 (1), S. 31–43. DOI: 10.1007/s13147-014-0322-7.
- GWS, Prognos & EWI (2014): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Osnabrück, Köln, Basel.
- Hake, J. F. & Rath-Nagel, S. (2015): Energiesicherheit: Fakten und Handlungsmöglichkeiten, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 65(4), S. 28–33.
- Hake, J. F. & Rath-Nagel, S. (2016): Energiesicherheit messen und bewerten, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 66(10), S. 36–41.
- Hanusch, H., Ilg, G., & Jung, M. (2011): Nutzen-Kosten-Analyse. 3. Auflage. München.
- Henbest, S. (2017): Approaches for using scenarios in strategic decision making. URL: <https://www.fsb-tcfd.org/wp-content/uploads/2017/09/TCFD-BoE-Scenario-Conference-BNEF-1-Nov-FOR-APP.pdf> [abgerufen am 22.08.2018].
- Hennicke, P. (2015): Energiewende: Chancen und Herausforderungen. In: W. Kurtzke und G. Quaißer (Hg.): Alternative Wirtschaftspolitik – Tro(o)st in Theorie und Praxis. Axel Troost zum 60. Geburtstag. 2. Auflage. Marburg, S. 185–206.
- Henning, H.-M. (2018): Der Beitrag der Solarthermie für die Wärmewende – Aktuelle Studien. Vortrag gehalten auf den Berliner Energietagen 2018. URL: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5039674.pdf [abgerufen am 23.08.2018].
- Hetherington, L. & Bloodworth, A. (2008): Industrial minerals production in Europe: current situation and future trends. Industrial Minerals (497), pp. 56–61.

- Hoffmann, C., Bofinger, S., Fishedick, M. & Martin, N. (2014): Die Energiewende als Innovationstreiber. In: FVEE-Themen: Forschung für die Energiewende – Phasenübergänge aktiv gestalten, S. 37–42.
- IG-BCE (2014): Geordneter Strukturwandel statt Energiewende zu Lasten der Beschäftigten. Medieninformation XVIII/26 vom 18.06.2014. URL: <https://halle-magdeburg.igbce.de/xviii-26-18-06-2014-wild-west-auf-den-energiemaerkten/81462> [abgerufen am 19.07.2018].
- International Energy Agency (2014). Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency. Paris.
- IEA-PVPS (2018): National Survey Report of PV Power Applications in GERMANY 2016; URL:http://www.iea-pvps.org/index.php?id=93&tx_damfrontend_pi1=&tx_damfrontend_pi1%5BcatPlus%5D=&tx_damfrontend_pi1%5BcatEquals%5D=&tx_damfrontend_pi1%5BcatMinus%5D=&tx_damfrontend_pi1%5BcatPlus_Rec%5D=68&tx_damfrontend_pi1%5BcatMinus_Rec%5D=&tx_damfrontend_pi1%5BtreeID%5D=201&tx_damfrontend_pi1%5Bid%5D=93 [abgerufen am 03.09.2018].
- IRENA (2016): Renewable Energy Benefits: Measuring the Economics. URL: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf [abgerufen am 11.07.2018].
- IRENA (2018a): Renewable power generation costs in 2017. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA (Hg.) (2018b): Renewable energy prospects for the European Union. URL: <http://www.irena.org/publications/2018/Feb/Renewable-energy-prospects-for-the-EU> [abgerufen am 19.02.2018].
- Käuferportal (2018): Solarkollektoren: Preise & Förderungen. URL: <https://www.kaeufportal.de/energie/solaranlagen/solarkollektoren-preise/> [abgerufen am 04.09.2018].
- Kemfert, C. (2017): Die Blockade der Energiewende wird die USA teuer zu stehen bekommen. In: DIW-Wochenbericht 84 (14/15). URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/157327/1/88392658X.pdf> [abgerufen am 18.06.2018].
- Khripko, D., Morioka, S. N., Evans, S., Hesselbach, J. & de Carvalho, M. M. (2017): Demand Side Management within Industry. A Case Study for Sustainable Business Models. In: Procedia Manufacturing 8, S. 270–277. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.034.
- Kim, H.-W., Dong, L., Choi, A. E., S., Fujii, M., Fujita, T. & Park, H.-S. (2018): Co-benefit potential of industrial and urban symbiosis using waste heat from industrial park in Ulsan, Korea. In: Resources, Conservation and Recycling 135, S. 225–234. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.027.

- Kitous, A., Keramidas, K., Vandyck, T. & Saveyn, B. (2016): GECO 2016. Global Energy and Climate Outlook Road from Paris. Hg. v. JRC, European Commission (Science for Policy Report). URL: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC101899/geco2016%20-%20global%20energy%20and%20climate%20outlook%20-%20road%20from%20paris%20160916.pdf> [abgerufen am 19.02.2018].
- Klemisch, H. & Boddenberg, M. (2016): Genossenschaftliche Prosumermodelle: Potenziale für eine verbraucherfreundliche Gestaltung der Energiewende. In: W. Schuldzinski, C. Bala, editors, Prosuming und Sharing – neuer sozialer Konsum: Aspekte kollaborativer Formen von Konsumtion und Produktion, 1. Auflage, Verbraucherzentrale NRW, Düsseldorf.
- Kost, C. & Schlegl, T. (2018): Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf [abgerufen am 22.08.2018].
- Lehr, U. (2009): More Baskets? Renewable Energy and Energy Security. GWS Discussion Paper 2009/8, Osnabrück.
- Lehr, U., Lutz, C. & Becker, L. (2018): Zur Berechnung der durch den Ausbau erneuerbarer Energien und durch Energieeffizienz verminderten Importe fossiler Brennstoffe – Methode und Ergebnisse für die Jahre 2000 bis 2015. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Osnabrück.
- Lehr, U., Ulrich, P., Lutz, C., Thobe, I., Edler, D., O'Sullivan, M., Simon, S., Naegler, T., Pfennig, U., Peter, F., Sakowski, F. & Bickel, P. (2015): Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland: Ausbau und Betrieb, heute und morgen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Osnabrück, Berlin, Stuttgart.
- Lehr, U., Walter, H. & Lutz, C. (2018): Energiewirtschaftliche Gesamtrechnung – Methoden und exemplarische Berechnungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Osnabrück.
- Liebreich, M. (2017): London summit 2017. London. URL: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/09/BNEF-Summit-London-2017-Michael-Liebreich-State-of-the-Industry.pdf> [abgerufen am 22.08.2018].
- Lindman, Å. & Söderholm, P. (2012): Wind power learning rates. A conceptual review and meta-analysis. In: Energy Economics 34 (3), S. 754–761. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.05.007.
- Löckener, R., Ulrich, P., Lehr, U., Sundmacher, T., Timmer, B. & Vorderwülbecke, A. (2016): Energiewende in Baden-Württemberg: Auswirkungen auf die Beschäftigung. Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf.
- Löschel, A., Moslener, U. & Rübelke, D. (2009): Indicators of energy security in industrialized countries. Energy Policy, Energy Policy 38 (2010) 1665–1671, doi:10.1016/j.enpol.2009.03.061.

- Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U., Kemmler, A., Kirchner, A. auf der Maur, A., Ziegenhagen, I., Wunsch, M., Koziel, S., Piégasa, A. & Straßburg, S. (2018): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende, Studie im Auftrag des BMWi, Osnabrück, Basel (unveröffentlicht).
- Lutz, C. & Breitschopf, B. (2016): Systematisierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte und Verteilungswirkungen der Energiewende. URL: <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport16-1.pdf> [abgerufen am 09.07.2018].
- Midttun, A. & Piccini, P. B. (2017): Facing the climate and digital challenge. European energy industry from boom to crisis and transformation. In: *Energy Policy* 108, S. 330–343. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.046.
- Morris, C. & Pehnt, M. (2016): *The German Energiewende Book*. Heinrich Böll Foundation.
- Nehler, T. & Rasmussen, J. (2016): How do firms consider non-energy benefits? Empirical findings on energy-efficiency investments in Swedish industry. In: *Journal of Cleaner Production* 113, S. 472–482. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.070.
- Nemet, G. F. (2006): Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. In: *Energy Policy* 34 (17), S. 3218–3232. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.06.020.
- O’Sullivan, M., Edler, D. & Lehr, U. (2018): *Ökonomische Indikatoren des Energiesystems – Methode, Abgrenzung und Ergebnisse für den Zeitraum 2000–2016*. GWS Research Report 2018/1, Osnabrück.
- Observ’ER, Renac, ECN, Fraunhofer ISI, Frankfurt School & cbs (2018): *The state of renewable energies in Europe, 2017*. Paris: Observ’ER (17th EurObserv’ER Report).
- Ostertag, K., Neuhäusler, P., Helmich, P., Frietsch, R., Walz, R., Gehrke, B. & Schasse, U. (2018): *Ful-Indikatoren zu Nachhaltigkeit und Klimaschutz: Forschung, Entwicklung, Innovation und Marktergebnisse*. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/175549/1/1015311814.pdf> [abgerufen am 21.03.2018].
- Parra, D., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Norman, S. A., Abdon, A., Worlitschek, J., O’Doherty, T., Rodrigues, L., Gillott, M., Zhang, X., Bauer, C., Patel, M. K. (2017): An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, S. 730–749. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.003.
- Pegels, A. & Lütkenhorst, W. (2014): Is Germany’s energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV. In: *Energy Policy* 74, S. 522–534. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.06.031.
- Pflüger, F. (2013): Resilienz – Schlüsselwort der Energiesicherheit, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 63. Jg., Heft 11, S. 30–33.

- Rennings, K. & Rexhäuser, S. (2014): Innovationswirkungen der Energiewende. In: GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 23 (4), S. 356–357. DOI: 10.14512/gaia.23.4.14.
- Ricardo, DIW & CAU (2014): Update of the Handbook on External Costs of Transport. URL: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/handbook_on_external_costs_of_transport_2014_0.pdf [abgerufen am 19.07.2018].
- Rösch, C. (2016): Agrophotovoltaik – die Energiewende in der Landwirtschaft. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 2016, 25(4), S. 242–246.
- Schäfer, D. (2017): Die Bedeutung örtlicher Versorgungsunternehmen als Akteure der Energiewende. Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie gGmbH, Wuppertal.
- Schill, W.-P., Canzler, W., Gailing, L., Quitzow, L. & Uhrlandt, D. (2016): (De-)zentrale Energiewende – Wirklichkeiten, Widersprüche und Visionen. In: Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung 85 (4), S. 15–27. DOI: 10.3790/vjh.85.4.15.
- Schleich, J., Walz, R. & Ragwitz, M. (2017): Effects of policies on patenting in wind-power technologies. In: Energy Policy 108, S. 684–695. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.06.043.
- Sensfuß, F. (2008): Assessment of the impact of renewable electricity generation on the German electricity sector. An agent-based simulation approach. Düsseldorf.
- Sievers, L. & Pfaff, M. (2016): Gesamtwirtschaftliche Nettoeffekte der Energiewende nach Regionen, Wirtschaftszweigen und Einkommensgruppen: Eine modellgestützte Analyse im Rahmen des Projekts „Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien (ImpRES)“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Karlsruhe.
- Stirling, A. (2009): Multicriteria diversity analysis: A novel heuristic framework for appraising energy portfolios. Energy Policy, 38(4), S. 1622–1634, doi:10.1016/j.enpol.2009.02.023.
- Tänzler, D., Luhmann, H., Supersberger, N., Fischdick, M., Maas, A. & Carius, A. (2017): Die sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Trianni, A., Cagno, E. & de Donatis, A. (2014): A framework to characterize energy efficiency measures. In: Applied Energy 118, S. 207–220. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.042.
- Trost, E., Büttgen, A. & Geringhoff, L. (2016): Deutungsmuster der Energiewende auf lokaler Ebene. Erste Ergebnisse aus NRW. KWI-Working Paper Nr. 4, Essen.
- Tsoskounoglou, M., Ayerides, G. & Tritopoulou, E. (2008): The end of cheap oil: Current status and prospects. Energy Policy, vol. 36(10), pp. 3797–3806.
- UBA (2012): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Dessau-Roßlau.

- UBA (Hg.) (2014a): Chancen und Potenziale grüner Zukunftsmärkte. Umweltforschungsplan des BMUB. adelphi; Roland Berger Strategy; GWS. URL: <https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/Chancen%20und%20Potenziale%20gr%C3%BCner%20Zukunftsm%C3%A4rkte.pdf> [abgerufen am 05.07.2018].
- UBA (2014b): Best-Practice Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeerzeugung. Anhang B der „Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten“. Stand: aktualisierte Fassung Februar 2014. Dessau-Roßlau.
- UBA (Hg.) (2016): Ökologische Modernisierung der Wirtschaft durch eine moderne Umweltpolitik. Synthesebericht. Umwelt, Innovation, Beschäftigung 02/2016. Unter Mitarbeit von BMUB. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uib_02_2016_oekologische_modernisierung_der_wirtschaft_durch_eine_moderne_umweltpolitik_0.pdf [abgerufen am 05.07.2018].
- UBA (2017a): Daten zur Umwelt 2017. Indikatorenbericht. Dessau-Roßlau.
- UBA (2017b): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016. Dessau-Roßlau.
- UBA (Hg.) (2018a): Innovationsmotor Umweltschutz: Forschung und Patente in Deutschland und im internationalen Vergleich. Aktualisierte Ausgabe 2017. Umwelt, Innovation, Beschäftigung 01/2018. Unter Mitarbeit von BMUB. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-20_uib_02-2018_patente_0.pdf [abgerufen am 05.07.2018].
- UBA (2018b): Indikator: Vermiedene THG-Emissionen durch erneuerbare Energien. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-vermiedene-thg-emissionen-durch#textpart-1> [aufgerufen am 19.07.2018].
- Ulrich, P., Lehr, U. & Lutz, C. (2018): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende in den Bundesländern. Methodische Ansätze und Ergebnisse, Studie im Auftrag des BMWi, Osnabrück (unveröffentlicht).
- Wangler, L. U. (2013): Renewables and innovation: did policy induced structural change in the energy sector effect innovation in green technologies? In: Journal of Environmental Planning and Management 56 (2), S. 211–237.
- Wenzel, B., Bruns, E., Adolf, M. & Ohlhorst, D. (2015): Erneuerbare Energien zur individuellen Wärme- und Kälteerzeugung. Innovationen und Herausforderungen auf dem Weg in den Wärmemarkt. INER e.V. Berlin.
- Westphal, K. (2012): Die Energiewende global denken, SWP-Aktuell 37.
- Wietschel, M., Plötz, P., Pfluger, B., Klobasa, M., Eßer, A., Haendel, M., Müller-Kirchenbauer, J., Kochems, J., Hermann, L., Grosse, B., Nacken, L., Küster, M., Pacem, J., Naumann, D., Kost, C., Kohrs, R., Fahl, U., Schäfer-Stradowsky, S., Timmermann, D. & Albert, D. (2018): Sektorkopplung: Definition, Chancen und Herausforderungen. Working Paper Sustainability and Innovation No. S01/2018.

- Wietschel, M., Thielmann, A., Plötz, P., Gnann, T., Sievers, L., Breitschopf, B., Doll, C. & Moll, C. (2017): Perspektiven des Wirtschaftsstandorts Deutschland in Zeiten zunehmender Elektromobilität. Fraunhofer ISI (Working Papers Sustainability and Innovation, S 09/2017). URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2017/WP09-2017_Perspektiven-Automobilindustrie-Elektromobilitaet_Wietschel-et-al.pdf [abgerufen am 09.07.2018].
- Winkler, J., Breitschopf, B., Harmelink, M., Cail, S., Mistré, M. & Ragwitz, M. (2018): Renewable Energy Directive Target. Study for the ITRE Committee. Directorate-General for Internal Policies, Policy Department, Economic and Scientific Policy A. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614201/IPOL_STU\(2018\)614201_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614201/IPOL_STU(2018)614201_EN.pdf) [abgerufen am 12.03.2018].
- Yu, C. F., van Sark, W.G.J.H.M. & Alsema, E. A. (2011): Unraveling the photovoltaic technology learning curve by incorporation of input price changes and scale effects. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (1), S. 324–337. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.001.
- Zhao, L., Feng, L. & Hall, C. (2009): Is peakoilism coming? Energy Policy, vol. 37(6), pp. 2136–2138.