

# Kohleausstieg jetzt einleiten

---

**STELLUNGNAHME** | Oktober 2017

## Impressum

Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU)  
Luisenstraße 46, 10117 Berlin  
Tel.: +49 30 263696-0  
info@umweltrat.de  
www.umweltrat.de  
(Redaktionsschluss: August 2017)

Die Veröffentlichungen des SRU sind auf der Homepage verfügbar  
und können über die Geschäftsstelle kostenfrei bestellt werden.

ISBN 978-3-947370-10-8

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Gestaltung: WERNERWERKE GbR, Berlin  
Satz: Typework Layoutsatz & Grafik GmbH, Augsburg

# Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)

## Prof. Dr. Claudia Hornberg (Vorsitzende)

Professorin für Umwelt und Gesundheit an der Universität Bielefeld

## Prof. Dr. Manfred Niekisch (stellvertretender Vorsitzender)

Professor für Internationalen Naturschutz an der Goethe-Universität Frankfurt und Direktor des Frankfurter Zoos

## Prof. Dr. Christian Calliess

Professor für öffentliches Recht, insbesondere Umweltrecht, und Europarecht am Fachbereich Rechtswissenschaft der Freien Universität Berlin

## Prof. Dr. Claudia Kemfert

Professorin für Energieökonomie und Nachhaltigkeit an der Hertie School of Governance, Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin

## Prof. Dr. Wolfgang Lucht

Professor am Geographischen Institut der Humboldt Universität zu Berlin, Ko-Leiter der Abteilung Erdsystemanalyse am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

## Prof. Dr.-Ing. Lamia Messari-Becker

Professorin für Gebäudetechnologie und Bauphysik an der Universität Siegen

## Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter

Professorin im Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie an der Technischen Universität Berlin

Die Ratsmitglieder bedanken sich für die sehr kompetente und engagierte Unterstützung durch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des SRU. Zum wissenschaftlichen Stab des Umweltrates gehörten während der Erstellung dieser Stellungnahme:

Dr. Julia Hertin (stellvertretende Generalsekretärin, kommissarische Leitung der Geschäftsstelle), Dr.-Ing. Mechthild Baron, Dipl. Geogr. Barbara Bernard, MSc Andrea Bues, Dr. rer. nat. Henriette Dahms, Dr. jur. Olaf Dilling; Ass. jur. Miriam Dross LL.M., Dr. rer. oec. Carl-Friedrich Elmer, Alexander Franke M.A., M. Eng. Patricia Horst, Dr. Timothy McCall, Dr. rer. nat. Markus Salomon, Dr. rer. nat. Elisabeth Schmid, Dipl.-Ing. Kristine Sperlich, Dr. rer.oec. Pao-Yu Oei, Annette Volkens M.A.

Zu den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Geschäftsstelle gehörten außerdem: Petra Busch, Ute Fritsch, Susanne Junker, Rainer Kintzel, Pascale Lischka, Dipl.-Bibl. (FH) Susanne Winkler und Sabine Wuttke.

## Danksagung

Der SRU dankt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Ministerien und Ämter des Bundes sowie den Vertreterinnen und Vertretern von Wissenschaft und Gesellschaft, die mit ihren Fachkenntnissen die Erstellung der Stellungnahme unterstützt haben. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, das Umweltbundesamt sowie ausgewählte Expertinnen und Experten haben einen Entwurf der Stellungnahme kommentiert.

### **Der SRU dankt insbesondere folgenden Sachverständigen für hilfreiche fachliche Hinweise:**

**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit:** Dr. Kerstin Anders, Axel Conrads, Lutz Keppner, Dr. Christa Solbach, Dirk Ubländer, Ulrich Weidemann, Martin Weiß

**Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** Beatrix Brodkorb, Laure Kaelble, Kathrin Karkoska, Max Rathmann

**Umweltbundesamt:** Rolf Beckers, Jürgen Landgrebe, Dr. Marcel Langner, Dr. Benjamin Lünenbürger, David Pfeiffer, Alexander Schülke, Dirk Wintermeyer

**Agora Energiewende:** Philipp Litz, Dr. Gerd Rosenkranz

**Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V.:** Dr. Olaf Aßbrock

**Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland:** Tina Löffelsend

**Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung:** Hanna Brauers, Sophie Schmalz

**European Environmental Bureau:** Christian Schaible

**Forum Ökologisch soziale Marktwirtschaft:** Rupert Wronski

**Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH:** Dr. Dr. Ulrich Franck

**Humboldt-Universität zu Berlin:** Dr. Roman Mendelevitch

**Institute for Advanced Sustainability Studies:** Daniela Setton

**Öko-Institut:** Hauke Hermann

**SST Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner Ingenieurgesellschaft mbH:** Jochen Drescher

**Technische Universität Berlin:** Prof. Dr. Christian von Hirschhausen

**VGB PowerTech e. V.:** Dr. Hans-Joachim Feuerborn

**Wuppertal Institut:** Timon Wehnert

Die volle Verantwortung für die vorliegende Stellungnahme übernehmen die Mitglieder des Sachverständigenrates für Umweltfragen.

(Redaktionsschluss: August 2017)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Nutzen eines Kohleausstiegs</b> .....	<b>6</b>
2.1 Klimaschutz.....	6
2.1.1 Folgen des Klimawandels für Deutschland und die Welt.....	6
2.1.2 Klimapolitische Notwendigkeit eines unverzüglichen Kohleausstiegs.....	9
2.1.3 Der Budgetansatz als Grundlage eines Kohleausstiegs.....	9
2.2 Positive Gesundheits- und Umwelteffekte eines Kohleausstiegs.....	12
2.2.1 Gesundheitswirkungen.....	13
2.2.2 Umweltwirkungen von Stickstoffoxiden.....	16
2.3 Energiewirtschaftliche Vorteile.....	16
<b>3 Herausforderungen eines Kohleausstiegs</b> .....	<b>17</b>
3.1 Auswirkungen auf Kraftwerke und Tagebaue.....	17
3.1.1 Braunkohleindustrie in Deutschland.....	17
3.1.2 Steinkohleindustrie in Deutschland.....	19
3.1.3 Veränderungen des Angebotes der Kraftwerksnebenprodukte Aschen und Gips..	19
3.1.4 Haftung für die Folgekosten der Braunkohletagebaue.....	20
3.2 Strukturentwicklung in den Kohleregionen.....	22
3.2.1 Direkte Arbeitsplätze in der Kohlewirtschaft.....	22
3.2.2 Indirekte und induzierte Arbeitsplatzeffekte.....	24
3.2.3 Altersstruktur der Beschäftigten in der Kohlewirtschaft.....	24
3.2.4 Abfederung von Strukturentwicklungen.....	25
3.2.5 Neue Perspektiven für die Kohleregionen.....	26
3.3 Sicherstellen der Versorgungssicherheit.....	28
<b>4 Gestaltung des Kohleausstiegs</b> .....	<b>31</b>
4.1 Schritte zur Reduktion der Kohleverstromung.....	31
4.1.1 Einbettung in die europäische Klimapolitik.....	31
4.1.2 Nationale CO <sub>2</sub> -Reduktionsansätze.....	31
4.1.3 Neue europäische Standards für Stickstoffoxidemissionen aus Kohlekraftwerken	33
4.1.4 Empfehlung für einen Kohleausstieg in drei Phasen.....	34
4.2 Kohleausstieg im Konsens.....	36
4.2.1 Mehrwert eines Kohlekonsenses.....	36
4.2.2 Auftrag einer Kohlekommission.....	37
4.2.3 Mitglieder und Arbeitsweise der Kommission.....	38
<b>5 Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>39</b>
<b>6 Literatur</b> .....	<b>40</b>

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b>	Entwicklung der Stromproduktion aus Kohle und erneuerbaren Energien von 1990–2016 (TWh/a) .....	8
<b>Abbildung 2</b>	Schematische Darstellung von Kohleausstiegspfaden, die ein einheitliches CO <sub>2</sub> -Emissionsbudget einhalten .....	10
<b>Abbildung 3</b>	Braunkohlekraftwerke und Tagebaue in Deutschland.....	18
<b>Abbildung 4</b>	Anteil der im Jahr 2015 in der Braunkohlewirtschaft Beschäftigten, die zum jeweiligen Zeitpunkt jünger als 60 Jahre sind.....	25
<b>Abbildung 5</b>	Schrittweise Abschaltung der Kohlekraftwerke in 3 Phasen.....	35

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b>	Kumulierte CO <sub>2</sub> -Emissionen für Deutschland 2015–2050 (Mt CO <sub>2</sub> ) .....	11
<b>Tabelle 2</b>	Entwicklung der Emissionen und Sektorziele für 2030 im Klimaschutzplan 2050.....	12
<b>Tabelle 3</b>	Produktion und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten aus Kohlekraftwerken in Deutschland im Jahr 2014.....	19
<b>Tabelle 4</b>	Mögliche Probleme und Lösungen bei der Haftung für die langfristigen Folgekosten des Braunkohleabbaus .....	22
<b>Tabelle 5</b>	Verbleibende direkte Arbeitsplätze in der Braun- und Steinkohleindustrie in Deutschland in Tausend.....	23
<b>Tabelle 6</b>	Bereitstellung von Systemdienstleistungen in einem auf erneuerbaren Energien basierten System .....	30
<b>Tabelle 7</b>	Mögliche Klimaschutzinstrumente und ihre finanzielle Auswirkung.....	32

# Zusammenfassung

Der durch menschliche Aktivitäten verursachte Klimawandel hat besorgniserregende Folgen für Deutschland und die Welt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland sind seit acht Jahren nicht mehr nennenswert gesunken – dies gilt trotz steigendem Anteil erneuerbarer Energien auch für die Stromerzeugung. Einen großen Anteil an den Emissionen hat die Verstromung von Braun- und Steinkohle. Diese ist aus verschiedenen Gründen, insbesondere wegen Versäumnissen bei der Energie- und Klimapolitik, in den letzten Jahren nahezu konstant geblieben.

1. Die neue Bundesregierung sollte daher unverzüglich einen Kohleausstieg einleiten. Damit könnten nicht nur große Emissionsreduktionen zu relativ geringen Kosten erreicht werden, sondern es gäbe zudem erhebliche positive Wirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit, vor allem, weil die Emissionen von Quecksilber, Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden und Feinstäuben reduziert würden. Eine emissionsarme Stromerzeugung ist darüber hinaus Voraussetzung für die erfolgreiche Dekarbonisierung des Verkehrs und der Wärmeversorgung, die im Zuge einer Sektorkopplung zunehmend strombasiert sein werden.

Um zügig aus der Kohleverstromung auszusteigen, sind verschiedene Herausforderungen anzugehen: Die verlässliche Versorgung mit Strom ist zu gewährleisten, der Ausstieg für die direkt betroffenen 20.000 bis 30.000 Arbeitsplätze in der Kohleindustrie sowie für die betroffenen Regionen ist sozialverträglich auszugestalten und die Finanzierung der Bergbau-Folgekosten muss abgesichert werden. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) hält alle drei Herausforderungen für lösbar und stellt in dieser Stellungnahme entsprechende Maßnahmen dar. Die neue Bundesregierung sollte zudem unmittelbar nach der Regierungsbildung folgende wichtige Entscheidungen zur Ausgestaltung eines Kohleausstiegs treffen:

## Festlegung eines CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets für die Kohlewirtschaft

- o Aus wissenschaftlicher Sicht sollten die zukünftigen Emissionen der deutschen Kohlekraftwerke die Gesamtmenge von 2.000 Mt CO<sub>2</sub> nicht überschreiten, wenn Deutschland den notwendigen Beitrag zum in Paris vereinbarten Klimaschutzabkommen leisten möchte. Die genaue Verteilung der Restmengen ist mit

Verteilungseffekten verbunden, die von der Politik mitbedacht werden müssen. Ein Festschreiben des verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets in einem entsprechenden Kohleausstiegsgesetz, vergleichbar mit dem Atomkonsens aus dem Jahr 2000, würde Planungssicherheit für Betreiber und weitere Betroffene leisten.

## Einleiten eines Kohleausstiegs in drei Phasen

- o Der SRU hält aus Gründen der wirtschaftlichen Strukturentwicklung und der Versorgungssicherheit einen dreistufigen Kohleausstieg für sinnvoll:
  - ein schneller Beginn des Ausstiegs mit der kurzfristigen Stilllegung besonders emissionsintensiver Kraftwerke bis 2020,
  - zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit und Abfederung der sozialen Herausforderungen ein vorübergehender Weiterbetrieb der moderneren Kohlekraftwerke bis 2030 mit begrenzter Auslastung,
  - ein sukzessives Abschalten der letzten Kohlekraftwerke im Verlauf der 2030er-Jahre unter Einhaltung des vorher festgelegten CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets.

## Einsetzen einer Kohlekommission zur parallelen Ausgestaltung des Ausstiegspfadens und der Strukturpolitik

- o Die Kommission sollte sich aus Betroffenen aller Bereiche zusammensetzen. Wichtig ist, dass sie die Bundesregierung nicht beim „Ob“ eines Kohleausstiegs berät, sondern beim „Wie“ entlang des von der Bundesregierung vorab definierten CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets. Parallel dazu müssen Strategien erarbeitet werden, wie sich die betroffenen Regionen weiterentwickeln sollen.

# 1 Einleitung

---

**2.** Wenn es in den nächsten Jahren nicht gelingt, die globalen Treibhausgasemissionen deutlich zu reduzieren, drohen katastrophale Folgen. Die dramatischen Auswirkungen eines unverminderten Klimawandels zeichnen sich immer stärker ab. Neueste Erkenntnisse weisen beispielsweise darauf hin, dass auch der Golfstrom stärker als bisher vermutet betroffen sein könnte (LIU et al. 2017). Dies hätte erhebliche Auswirkungen auch auf das hiesige Klima. Weiterhin spielen die Folgen des Klimawandels – in enger Verbindung mit daraus resultierender Nahrungsmittelknappheit und Armut – auch eine große Rolle für Migrationsbewegungen.

Auf der anderen Seite gibt es in den letzten Jahren auch viele hoffnungsvolle Entwicklungen. Die Klimakonferenzen in Paris (2015) und Marrakesch (2016) haben gezeigt, dass immer mehr Länder sich ihrer Verantwortung bewusst sind. In den letzten Jahren blieben die globalen Emissionen trotz eines anhaltenden Wirtschaftswachstums ungefähr konstant (LE QUÉRÉ 2016). Die Kohleverstromung beginnt in China zurückzugehen und steigt in Indien langsamer an als bisher. Dies könnte dazu führen, dass die für 2030 global erwarteten Emissionen trotz des jüngsten Richtungswechsels in der US-amerikanischen Klimapolitik unterschritten werden (HÖHNE et al. 2017). Ursache dafür ist auch der Erfolg der erneuerbaren Energien, insbesondere der Photovoltaik und Onshore-Windkraftanlagen. Beide Technologien haben in den letzten Jahren eine starke Kostendegression erfahren und sind vielerorts bereits günstiger als konventionelle Kraftwerkstechnologien.

**3.** Deutschland steht vor einer paradoxen Situation: Zwar hat es durch die frühzeitige Förderung der erneuerbaren Energien maßgeblich zu deren erfolgreichen globalen Verbreitung beigetragen. Dennoch besteht die Gefahr, dass die eigenen nationalen Klimaschutzziele für 2020 und 2030 nicht eingehalten werden. Die Treibhausgasemissionen in Deutschland sind seit acht Jahren nicht mehr nennenswert gesunken. Das ist insbesondere auf die nahezu konstant gebliebene Verstromung der Kohle zurückzuführen, welche mehr als ein Viertel der nationalen Emissionen verursacht (UBA 2017c). Aus diesem Grund muss die Bundesregierung nach Auffassung des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen beschließen. Ein wichtiger Schritt Richtung Zielerreichung wäre hierbei der unverzügliche Beginn eines Ausstieges aus der Kohleverstromung. Die Klimaschutzziele jetzt aufzuweichen, wäre dagegen unverantwortlich.

Durch die widersprüchliche Entwicklung wird Deutschland seiner internationalen Verantwortung nicht gerecht und setzt – als Gastgeber der internationalen Klimakonferenz 2017 – seine internationale Glaubwürdigkeit aufs Spiel (SRU 2016). Mit dieser Stellungnahme fordert der SRU die Bundesregierung daher eindringlich auf, schnellstmöglich einen schrittweisen Kohleausstieg zu initiieren und diesen durch einen konsensorientierten Beteiligungsprozess zu begleiten.

## 2 Nutzen eines Kohleausstiegs

---

**4.** Eine schnelle und wirksame Reduzierung der Kohleverstromung in Deutschland würde einen wichtigen und kostengünstigen Beitrag zum Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschutz leisten. Sie hätte zudem große energieökonomische Vorteile.

### 2.1 Klimaschutz

#### 2.1.1 Folgen des Klimawandels für Deutschland und die Welt

**5.** Die Risiken eines ungebremsen Klimawandels sind für viele Sektoren ausführlich untersucht (IPCC 2014;

O'NEILL et al. 2017). So werden tief greifende Veränderungen für die Ökosysteme erwartet (OSTBERG et al. 2013; GERTEN et al. 2013). Dies gilt nicht nur für Korallenriffe und die Lebensräume der Arktis, die bereits jetzt stark vom Klimawandel beeinflusst werden. Modellberechnungen zeigen selbst bei einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 °C, dass bis zu ein Fünftel der globalen Landfläche mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest einen mittelstarken Ökosystemwandel durchleben könnte. Bei einem Temperaturanstieg um 5 °C jedoch wäre das für ungefähr 80 % der globalen Landfläche der Fall (OSTBERG et al. 2013). Dies hätte Veränderungen der grundlegenden biogeochemischen und strukturellen Eigenschaften eines Ökosystems zur Folge, woraus

das Risiko einer substanziellen Änderung ganzer Ökosystemeigenschaften resultiert. Ähnlich tief greifende Auswirkungen werden für Meeresökosysteme vorhergesagt (HOEGH-GULDBERG und BRUNO 2010).

Darüber hinaus treten bereits jetzt zunehmend extreme Wetterereignisse wie Hitze- und Dürreperioden, Extremniederschläge und Überschwemmungen auf. Die daraus resultierenden Risiken für Mensch und Natur werden sich mit erhöhtem Treibhausgasausstoß vergrößern. So kann bei einer ambitionierten Klimapolitik mit einem Meeresspiegelanstieg von 28 bis 56 cm, bei unverminderten Treibhausgasemissionen jedoch mit 57 bis 131 cm bis zum Jahre 2100 gerechnet werden (MENGEL et al. 2016). Ein solcher Anstieg hätte existenzielle Konsequenzen für einige Regionen, wie beispielsweise die Malediven, deren Inseln kaum mehr als einen Meter über dem Meeressniveau liegen.

Zudem wird damit gerechnet, dass sich mit steigenden Temperaturen auch die Süßwasserverfügbarkeit wesentlich verringert (SCHEWE et al. 2014). So werden die Auswirkungen eines Temperaturanstieges über 2 °C voraussichtlich dazu führen, dass der Anteil der unter Bedingungen absoluter Wasserknappheit lebenden Menschen um 40 % steigt (ebd.). Die schwindende Verfügbarkeit von Süßwasser hätte in einigen Regionen schwerwiegende Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion (ELLIOTT et al. 2014). Die Auswirkungen des Klimawandels führen unter anderem deswegen in vielen Erdregionen zu einem Rückgang der Erträge der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion (ROSENZWEIG et al. 2014). Im Afrika südlich der Sahara kann bereits eine globale Erwärmung von 1,5 °C bis 2030 dazu führen, dass 40 % der derzeitigen Maisanbaufläche für die verwendeten Sorten nicht mehr geeignet ist (World Bank 2013). Sollte die Temperatur um mehr als 2 °C steigen, so könnten die gesamten landwirtschaftlichen Erträge nicht nur in dieser Region um rund 15 bis 20 % zurückgehen (ebd.), was tief greifende Folgen für die Ernährungssicherheit hätte. Dies würde möglicherweise auch zu Flüchtlingsbewegungen aus den entsprechenden Regionen beitragen. Veränderungen des Klimasystems haben darüber hinaus direkte und indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Zum einen beeinflussen die Zunahme extremer Wetterereignisse, wie zum Beispiel Hitzeperioden, direkt die menschliche Gesundheit in Form von erhöhten Mortalitäten und Morbidität (IPCC 2014, S. 741). Darüber hinaus bestehen indirekte Effekte, die sich aus der Änderung von Umwelt und Ökosystemen ergeben. Durch die Änderung des Verbreitungsgebietes von krankheitsübertragenden Insekten verändert sich beispielsweise auch das Vorkommen bestimmter Krankheiten (ebd.). Eine weitere indirekte Folge des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit resultiert aus den gesellschaftlichen Verände-

runge, die der Klimawandel mit sich bringt (ebd.). Unterernährung, mentaler Stress und finanzielle Verluste können aus klimawandelbedingten Entwicklungen folgen und negativ auf die menschliche Gesundheit wirken (ebd.).

6. Eine fortschreitende Klimaerwärmung kann zu großskaligen und häufig unwiderruflichen Veränderungsprozessen im Erdsystem führen. Diese „Kippunktprozesse“ sind nichtlineare Prozesse, die bei Übertreten eines kritischen Schwellenwertes einen qualitativen Zustandswechsel durchlaufen. Im Erdsystem kann dies zu grundlegenden Veränderungen der Lebensgrundlagen eines Großteils der Menschheit führen. Beispielsweise wurden Belege dafür entdeckt, dass die thermohaline Atlantikzirkulation an Kraft verliert, was vermutlich mit einem klimawandelbedingten Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes in Zusammenhang steht (RAHMSTORF et al. 2015; LIU et al. 2017). Bei einer weiteren Temperaturerhöhung besteht das Risiko, dass sich diese Entwicklung verschärft. Die auch vereinfachend als „Golfstromsystem“ bezeichnete Atlantikzirkulation sorgt dafür, dass warme Wassermassen in den Norden transportiert werden, und bewirkt dort damit ein mildes Klima. Eine Abschwächung dieses Umwälzsystems hätte drastische Auswirkungen auf die Wettersysteme insbesondere in Europa (LEVERMANN et al. 2012; 2005).

7. Auch in Deutschland äußern sich die Auswirkungen des Klimawandels regional unterschiedlich, betreffen grundsätzlich aber viele verschiedene gesellschaftliche Bereiche (BRASSEUR et al. 2017). Bei einem ungebremsten Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen wird auch für Deutschland erwartet, dass sich die bereits bestehenden Veränderungen des Klimasystems deutlich verschärfen (DEUTSCHLÄNDER und MÄCHEL 2017). Dies bezieht sich beispielsweise auf die steigende Anzahl von Hitzetagen und das Auftreten von Hitzewellen. Die Hitzewelle 2003 forderte in mehreren Ländern Europas zwischen 25.000 und 52.000 zusätzliche Todesfälle (LARSEN 2006; KOPPE et al. 2004). In Frankreich wurden zum Beispiel 15.000 Todesfälle registriert, in Italien circa 10.000 und Deutschland hatte etwa 7.000 Todesopfer zu verzeichnen (GREWE et al. 2014; JENDRITZKY 2007; ROBINE et al. 2007).

Darüber hinaus wird für Deutschland mit einer Veränderung des Niederschlagsmusters gerechnet. Viele Regionen in Deutschland erleben bereits, dass winterliche Starkniederschläge zunehmen und Hagelschlag häufiger auftritt. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend bei ungebremstem Klimawandel weiter intensiviert (KUNZ et al. 2017). Außerdem wird von einem Anstieg von Hochwasserereignissen ausgegangen. Eine Studie, die die fünf

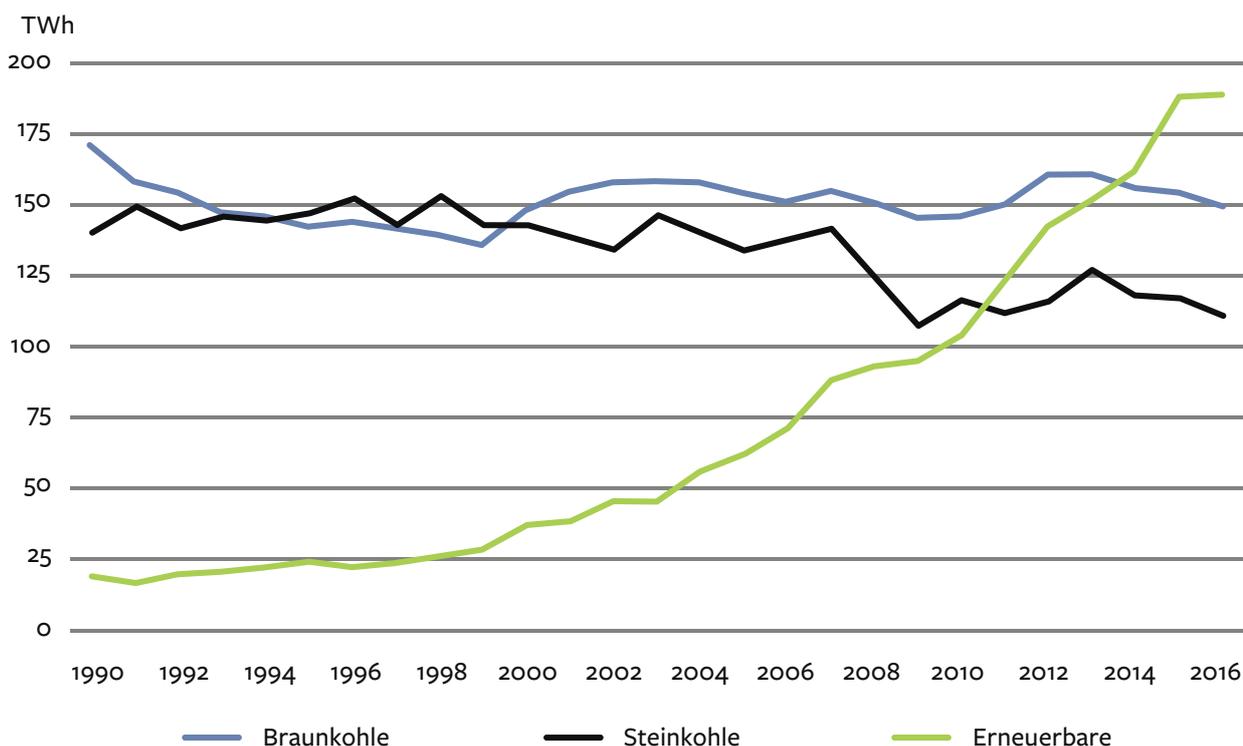
größten Flüsse Deutschlands betrachtete, kam zu dem Ergebnis, dass bei einem ungebremsten Klimawandel bis Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme von Hochwasserschäden gerechnet werden muss (HATTERMANN et al. 2016). Das Hochwasser an der Elbe im Jahr 2013 zeigte die möglichen Ausmaße derartiger Extremereignisse.

Sowohl die prognostizierten Temperatur- als auch Niederschlagsveränderungen bringen auch in Deutschland Risiken für die menschliche Gesundheit, Natur und Umwelt mit sich. Beispielsweise zeichnen sich überwiegend negative Auswirkungen auf den Boden in Deutschland ab (PFEIFFER et al. 2017). Die organische Substanz sowie die Nährstoffreserven in den Böden nehmen ab. Zusammen mit abwechselnder oder regional unterschiedlich auftauchender Vernässung, Austrocknung und Bodenerosion führt dies zu einer abnehmenden Bodenfruchtbarkeit und gefährdet somit die Produktionsfunktion des Bodens. Auch der Wald in Deutschland ist betroffen. Im Zuge des Klimawandels verändern sich die Verbreitungsgebiete von Baumarten und die Artenzusammensetzung der Wälder. Veränderte Niederschlagsstrukturen und längere Hitzeperioden begünstigen die Entwicklung von Schadinsekten sowie das Auftreten von Waldbränden (KÖHL et al. 2017).

Die durch den Klimawandel veränderten Witterungsbedingungen belasten auch die menschliche Gesundheit (AUGUSTIN et al. 2017). Vor allem chronisch Kranke und alte Menschen sind von einer steigenden Anzahl übermäßig warmer Tage sowie der Zunahme von Hitzewellen betroffen. Sehr heiße Tage belasten zum Beispiel Personen mit Vorerkrankungen (u. a. Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankte) und die Gruppe der älteren Menschen sowie Säuglinge und Kleinkinder (AUGUSTIN et al. 2011; GABRIEL und ENDLICHER 2011; GARCÍA-HERRERA et al. 2010; JENDRITZKY 2007; EIS et al. 2010; OUDIN ÅSTRÖM et al. 2015; UBA 2015b; XU et al. 2014a; 2014b). Im Arbeitsleben kann in bestimmten Berufszweigen das Risiko für hitzebedingte Leistungseinbußen und damit verbundene Arbeitsausfälle zunehmen (HORNBERG und PAULI 2010). Dies gilt insbesondere in Ballungsräumen. Der Klimawandel kann sich auch negativ auf die Luftqualität auswirken. Dies kann zu einem häufigeren Auftreten von Atemwegs-, Herz-Kreislauf- sowie Infektionskrankungen führen, was nicht nur erhebliche Folgen für das menschliche Wohlbefinden mit sich bringt, sondern auch Kosten im Gesundheitssystem zur Folge hat (TRÖLTZSCH et al. 2012).

o **Abbildung 1**

Entwicklung der Stromproduktion aus Kohle und erneuerbaren Energien von 1990–2016 (TWh/a)



SRU 2017; Datenquelle: AGEB 2017

Die dargestellten Auswirkungen eines ungebremsten Klimawandels für Deutschland betreffen nur die kurz- bis mittelfristige Perspektive. Längerfristig werden sich bei steigenden Temperaturen voraussichtlich noch tief greifendere Auswirkungen durch Veränderungen in den großräumigen atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationen ergeben. Dies hätte auch in Deutschland unvorhersehbare Folgen für das Klima, die Ökosysteme, die Lebensverhältnisse und das Wirtschaftssystem.

## 2.1.2 Klimapolitische Notwendigkeit eines unverzüglichen Kohleausstiegs

**8.** Mit dem Klimaabkommen von Paris hat sich die Weltgemeinschaft das Ziel gesetzt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, zu begrenzen. Legt man eine gerechte Verteilung des verbleibenden globalen CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets zugrunde (vgl. Abschn. 2.1.3), müsste Deutschland bis zur Mitte des Jahrhunderts nahezu treibhausgasneutral wirtschaften, um einen angemessenen globalen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Ein Drittel der derzeitigen Treibhausgasemissionen Deutschlands sind auf die Energiewirtschaft zurückzuführen, davon werden wiederum 85 % durch die Verstromung von Kohle verursacht (UBA 2017c). Die klimapolitisch notwendige Abkehr von der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs impliziert daher mittelfristig (in den nächsten zwanzig Jahren) den Ausstieg aus der CO<sub>2</sub>-intensiven Kohleverstromung und langfristig (in den nächsten dreißig Jahren) auch den Ausstieg aus den fossilen Energien Erdgas und Erdöl (Agora Energiewende 2017).

**9.** Der starke Zuwachs der erneuerbaren Energien hat in den letzten Jahren die Abschaltung der Atomanlagen überkompensiert. Dennoch sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland in den letzten Jahren weder bei der Stromerzeugung noch in der Gesamtbilanz ausreichend gesunken, um die Klimaschutzziele einzuhalten. Der Hauptgrund hierfür sind die Emissionen durch die konstante Verstromung von Braun- und Steinkohle, die seit 1990 auf einem hohen Niveau verläuft (s. Abb. 1). So wurden die CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Stilllegung von älteren Kraftwerksblöcken zu großen Teilen durch die Emissionen von neueren, wenn auch effizienteren, Blöcken kompensiert (UBA 2017a).

Die konstante Verstromung von Braun- und Steinkohle ist vor allem auf den niedrigen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis sowie den Rückgang der globalen Steinkohlepreise zurückzuführen. Daher liegen die variablen Kosten von Braun- und Steinkohleanlagen deutlich unterhalb derer von Gaskraftwerken. Die resultierenden niedrigen Börsenstrompreise

verringern die Wirtschaftlichkeit aller fossilen Kraftwerke. Insbesondere Gaskraftwerke in Deutschland und anderen Nachbarländern werden dadurch immer seltener eingesetzt und aus dem Markt gedrängt.

## 2.1.3 Der Budgetansatz als Grundlage eines Kohleausstiegs

**10.** Für den Klimaschutz ist nicht entscheidend, wann genau das letzte Kohlekraftwerk vom Netz genommen wird oder wie hoch die CO<sub>2</sub>-Emissionen in festgelegten Zieljahren sind, sondern welche Gesamtmenge an CO<sub>2</sub> über einen Betrachtungszeitraum freigesetzt wird. Daher ist es sinnvoll, die maximale Gesamtmenge zu berechnen, welche mit einem angemessenen deutschen Beitrag zum internationalen Klimaschutz korrespondiert (sog. Budgetansatz). Ausgehend von diesem Budgetansatz wird deutlich, dass frühzeitige Einsparungen helfen können, Restmengen für spätere Emissionen zu erhalten (s. Abb. 2). Umgekehrt erfordert ein spätes Handeln dann umso stärkere Einschnitte. Emissionsziele für bestimmte Zwischenjahre sind hierbei als Orientierungsmarken wichtig, müssen aber mit dem Gesamtbudget vereinbar sein.

**11.** Im folgenden Abschnitt werden die wissenschaftlichen Grundlagen für ein – letztlich politisch zu definierendes – CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget für die Kohleverstromung in Deutschland dargestellt. In einem zweiten Schritt werden diese Zahlen mit den kumulierten Emissionen verglichen, die sich aus verschiedenen für die Bundesregierung erarbeiteten Klimaschutzszenarien ergeben.

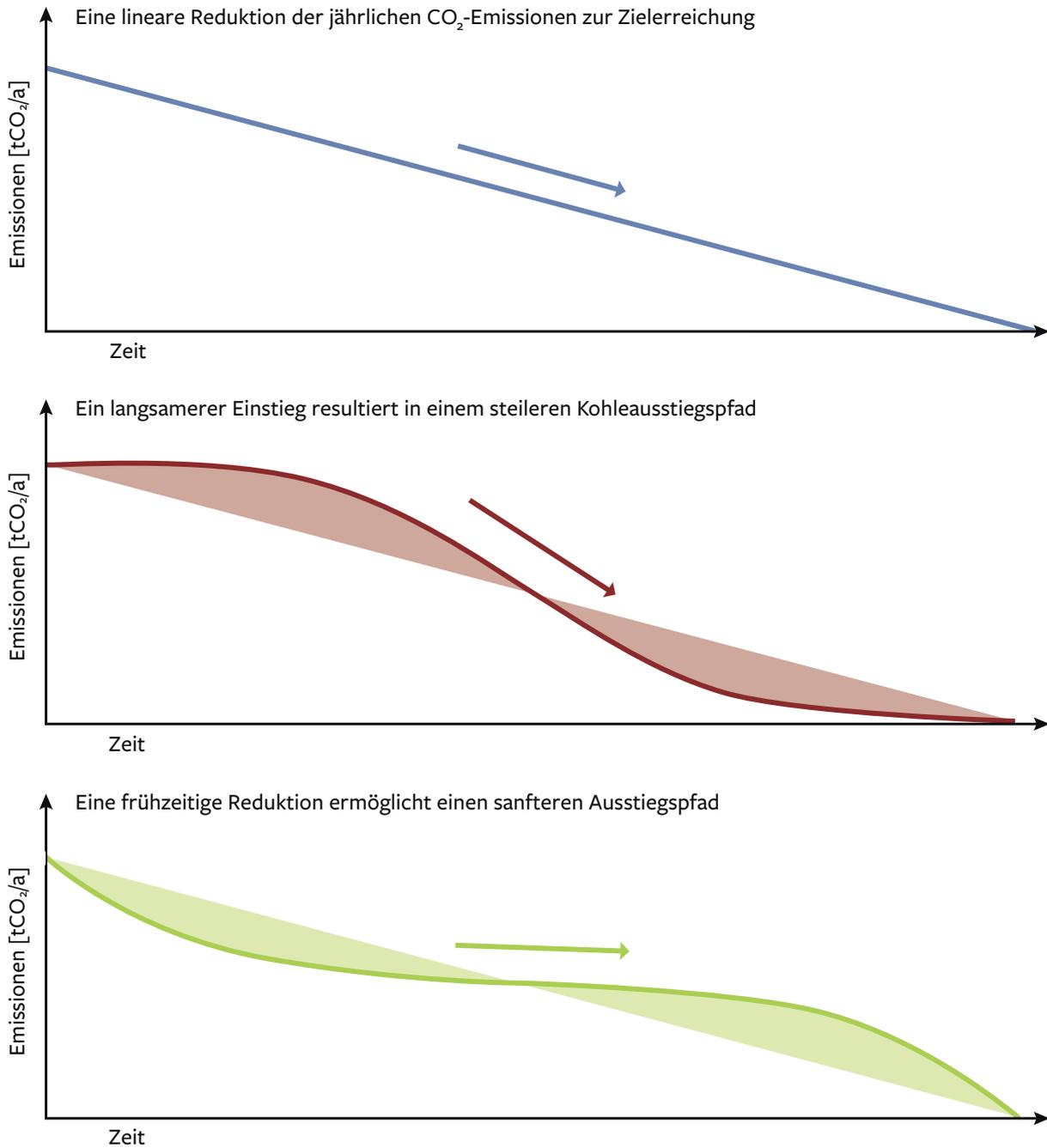
### Berechnung eines CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets für die Energiewirtschaft und die Kohleverstromung

**12.** Damit das 2°-Ziel erreicht werden kann, dürfen die kumulierten globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen ab dem Jahr 2011 die Menge von ungefähr 1.000 Gt nicht übersteigen (IPCC 2013, S. 25). Zwischen 2011 und 2014 wurden 157 Gt CO<sub>2</sub> emittiert. Somit verbleiben ungefähr 850 Gt CO<sub>2</sub> zu Beginn des Jahres 2015 (ROGELJ et al. 2016). Strebt man ein 1,5°-Ziel an, verbleiben im Jahr 2015 dagegen nur etwa 240 Gt CO<sub>2</sub>. Die Berechnungen gehen dabei von einer 66 %igen Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung aus. Um eine höhere Wahrscheinlichkeit zu erzielen, müssten noch stärkere Emissionsreduktionen erreicht werden.

Werden negative Emissionen (z. B. durch die Kopplung von Biomassenutzung und CO<sub>2</sub>-Abscheidung) oder andere Geoengineering-Technologien einbezogen, könnte das verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget zusätzlich erhöht werden. Für diese Technologien ist jedoch eine Marktreife

o **Abbildung 2**

Schematische Darstellung von Kohleausstiegspfaden, die ein einheitliches CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget einhalten



SRU 2017

noch nicht abzusehen. Sie sind voraussichtlich mit hohen Kosten und schwer kalkulierbaren Risiken für die Ökosysteme verbunden (SRU 2009). Eine nachhaltige Klimaschutzstrategie sollte daher anstreben, die Vermeidungsziele ohne die Anwendung von Geoengineering und negativen Emissionstechnologien zu erreichen.

**13.** Bei einer Aufteilung des verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets auf einzelne Länder ist eine zentrale Frage, wie mit historischen Emissionen umgegangen wird. Rechnet man in der Vergangenheit angefallene Emissionen

bei der Verteilung des Restbudgets an, sinkt der Anteil, der für die historisch emissionsintensiven Länder noch zur Verfügung steht. Würde der gesamte Treibhausgasausstoß seit der Industrialisierung vollständig verrechnet, hätten die meisten industrialisierten Länder – so auch Deutschland – ihren Anteil am Gesamtemissionsbudget bereits ausgeschöpft oder sogar deutlich überschritten (MATTHES et al. 2017). Ein anderer Ansatz ist es, als Ausgangspunkt für die Emissionsaufteilung erst den Zeitpunkt der Einigung der Staatengemeinschaft auf das gemeinsame Klimaziel, das heißt des Klimaabkom-

mens von Paris im Jahr 2015, festzusetzen. In diesem Fall könnten die nationalen Emissionsanteile basierend auf einem global einheitlichen Pro-Kopf-Budget berechnet werden. Im Jahr 2015 betrug der Anteil der deutschen Bevölkerung (81,4 Mio.) an der Weltbevölkerung (7.346,6 Mio.) 1,1 %. Für die Einhaltung des 1,5°-Zieles (mit 66 %iger Wahrscheinlichkeit) ergibt sich somit für Deutschland ein Emissionsbudget von 240 Gt CO<sub>2</sub> \* 1,1 % = 2.600 Mt CO<sub>2</sub>. Entsprechende Berechnungen für das 2°-Ziel kommen zu einem Emissionsbudget von 850 Gt CO<sub>2</sub> \* 1,1 % = 9.350 Mt CO<sub>2</sub> (MATTHES et al. 2017). Diese Werte liegen deutlich unterhalb der kumulierten Emissionen von 13.500 bis 17.600 Mt CO<sub>2</sub>, die sich aus Szenarien für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) ergeben (s. Tab. 1; Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015).

**14.** Für die Verteilung des verbleibenden nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets auf die einzelnen Sektoren wurde in einer Studie von Öko-Institut und Prognos (MATTHES et al. 2017) der derzeitige Anteil von 40 bis 42 % der Gesamtemissionen als Ausgangsbasis für die Energiewirtschaft fortgeschrieben. Viele andere Studien gehen jedoch davon aus, dass die Stromerzeugung schneller dekarbonisiert werden sollte als andere Sektoren, weil hier Einsparpotenziale kostengünstiger zu erreichen sind (UBA 2016b). So wird der Energiewirtschaft in einer

Studie für das Bundesumweltministerium (Öko-Institut 2015) ein geringerer Anteil von 32 % der kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 2015 bis 2050 zugewiesen. Auch im Klimaschutzplan 2050 werden von der Energiewirtschaft bis zum Jahr 2030 die größten prozentualen wie absoluten Einsparungen eingefordert, was faktisch einer Halbierung der Emissionen im Vergleich zu 2014 entspricht (s. Tab. 2; BMUB 2016). Dieser größere Minderungsbeitrag der Energiewirtschaft ist auch konsistent mit Berechnungen der Europäischen Kommission (Europäische Kommission 2011) und verschiedenen wissenschaftlichen Berechnungen (SRU 2011; Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2014; NITSCH 2013; KLAUS et al. 2010).

**15.** Wenn der Energiewirtschaft in Deutschland ein Anteil von 32 % an den nationalen Restemissionen zugewiesen wird, ergibt sich (selbst bei Vernachlässigung der historischen Emissionen) auf Basis des global verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets zur Einhaltung des 2°-Zieles eine Restmenge von rund 3.000 Mt CO<sub>2</sub>. Für die Einhaltung des 1,5°-Zieles wären es dagegen nur rund 800 Mt CO<sub>2</sub>. Aus wissenschaftlicher Sicht sollte das CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget für die Energiewirtschaft in Deutschland für den Zeitraum 2015 bis 2050 daher unterhalb von 3.000 Mt CO<sub>2</sub> liegen, wenn Deutschland einen angemessenen Beitrag zum in Paris vereinbarten Klimaschutz leisten möchte. Der Anteil der Kohlewirtschaft an diesem Maximal-

o **Tabelle 1**

Kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionen für Deutschland 2015–2050 (Mt CO<sub>2</sub>)

Verschiedene Berechnungsansätze und Szenarien		Gesamtemissionen	Energiewirtschaft	Kohleverstromung
Pro Kopf Ansatz aus globalem CO <sub>2</sub> -Budget	Berücksichtigung historischer Dimension (1,5°- und 2°-Ziel)	bereits überschritten	bereits überschritten	bereits überschritten
	Zielerreichung 1,5 °C (66 % Wahrscheinlichkeit)	2.600	800	< 500
	Zielerreichung 2 °C (66 % Wahrscheinlichkeit)	9.350	3.000	< 2.000
Klimaschutzszenario	Szenario KS 95 des BMUB	13.500	4.300	2.300
	Szenario KS 80 des BMUB	17.600	5.600	3.800
Klimaschutzplan 2050	Kumulierte Emissionen basierend auf dem Zwischenziel für 2030	Nur Angaben für Gesamt-Treibhausgase	4.100 (bis 2030)	Keine Angabe

Annahmen zur Berechnung: Beim Pro-Kopf-Ansatz werden der Energiewirtschaft 32% der deutschen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen zugeteilt; beim Klimaschutzplan wird von einer linearen Reduktion der Emissionen bis 2030 ausgegangen.

## o Tabelle 2

Entwicklung der Emissionen und Sektorziele für 2030 im Klimaschutzplan 2050

	Treibhausgasemissionen in Deutschland (Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent)				Emissionsminderung in %					
	1990	2014	2030		Real: 1990–2014	Ziel: 2014–2030		Ziel: 1990–2030		
			von	bis		von	bis	von	bis	
<b>Energiewirtschaft</b>	466	358	175	183	23 %	51 %	49 %	62 %	61 %	
<b>Gebäude</b>	209	119	70	72	43 %	41 %	39 %	67 %	66 %	
<b>Verkehr</b>	163	160	95	98	2 %	41 %	39 %	42 %	40 %	
<b>Industrie</b>	283	181	140	143	36 %	23 %	21 %	51 %	49 %	
<b>Landwirtschaft</b>	88	72	58	61	18 %	19 %	15 %	34 %	31 %	
<b>Sonstige</b>	39	12	5	5	69 %	58 %	58 %	87 %	87 %	
<b>Gesamtsumme</b>	<b>1248</b>	<b>902</b>	<b>543</b>	<b>562</b>	<b>28 %</b>	<b>40 %</b>	<b>38 %</b>	<b>56 %</b>	<b>55 %</b>	

SRU 2017; Datenquelle: BMUB 2016

budget sollte die Menge von 2.000 Mt CO<sub>2</sub> nicht überschreiten, um ein Budget von 1.000 Mt CO<sub>2</sub> für die emissionsärmeren und zumeist flexibleren Gaskraftwerke zu sichern. Für das ambitioniertere 1,5°-Ziel ergibt sich für die kumulierten Emissionen der deutschen Kohlekraftwerke ein Budget von maximal 500 Mt CO<sub>2</sub>. Die jährlichen Emissionen der Kohlekraftwerke in Deutschland betragen ungefähr 250 Mt CO<sub>2</sub>. Es wird deutlich, dass durch das Aufschieben des Ausstiegs aus der Kohleverstromung ein extrem ambitionierter Zielkorridor entstanden ist. Die bevorstehende Legislaturperiode bietet somit die letzte Chance, die Weichen für eine angemessene Umsetzung der Pariser Klimaschutzziele in Deutschland zu stellen.

Die aktuellen Klimaschutzszenarien für das Bundesumweltministerium (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) resultieren in kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energiewirtschaft von 4.300 bis 5.600 Mt CO<sub>2</sub>, welche das mit dem 2°-Ziel vereinbare CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget deutlich überschreiten. Mit 2.300 bis 3.800 Mt CO<sub>2</sub> wird ein Großteil dieser Emissionen von Kohlekraftwerken verursacht. Auch die im Klimaschutzplan 2050 geplanten Einsparungen seitens der Energiewirtschaft führen bei linearem Reduktionsverlauf bis 2030 bereits zu Gesamtemissionen von 4.100 Mt CO<sub>2</sub> (s. Tab. 1). Auch dieser Reduktionspfad überschreitet das aus Paris abgeleitete CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget und ist daher nicht konsistent mit dort vereinbarten Klimaschutzziele. Damit würde Deutschland keinen angemessenen Beitrag zum globalen Klimaschutz leisten. Würde die Energiewirtschaft – oder Deutschland insgesamt – ein größeres CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget in Anspruch nehmen, erforderte dies zusätzliche Einsparungen aus anderen Sektoren oder Ländern, um das Gesamtemissionsziel zu erreichen.

Wann genau das letzte Kohlekraftwerk vom Netz geht, ist klimapolitisch zweitrangig, solange das vereinbarte CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget eingehalten wird. Studien, die auf die Einhaltung des Klimaabkommens von Paris abzielen, gehen aber davon aus, dass der Kohleausstieg bis 2030 oder spätestens 2035 vollendet sein muss (MATTHES et al. 2017; PIETRONI et al. 2017).

## 2.2 Positive Gesundheits- und Umwelteffekte eines Kohleausstiegs

**16.** Kohlekraftwerke sind wesentliche Emittenten von Quecksilber, Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>). So waren im Jahr 2015 alle Kraftwerke der Energiewirtschaft für etwa 65 % (5,9 kt) der Quecksilberemissionen, 61 % (213,9 kt) der Schwefeldioxidemissionen und 24,8 % (293,9 kt) der Stickstoffoxidemissionen in Deutschland verantwortlich (UBA 2016a). Diese Emissionen stammen insbesondere aus Kohlekraftwerken (ca. 95 % der Quecksilber- und ca. 70 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen: UBA 2017e). Für Feinstaub (PM<sub>10</sub>) liegt der Anteil der Energiewirtschaft an den Gesamtemissionen bei knapp 5 % (10,2 kt) (UBA 2016a), allerdings sind Stickstoffoxide und Schwefeldioxid auch Vorläufer-substanzen für Sekundärpartikel. Somit tragen diese Emissionen aus Kohlekraftwerken noch zusätzlich zur Feinstaubbelastung bei.

Die Schwefeldioxidemissionen wurden in der Vergangenheit durch rechtliche Vorgaben sehr deutlich gemindert und stellen für die Gesundheit und die Umwelt in der Regel keine zentrale Herausforderung mehr dar (UBA

2013). Anders ist die Situation für Quecksilber, Stickstoffoxide und Feinstaub, auf die im Folgenden deshalb näher eingegangen wird.

Ein Ausstieg aus der Kohleverstromung würde durch den Wegfall der vorgenannten Emissionen zu positiven Gesundheits- und Umwelteffekten führen, wenn Kohlekraftwerke nicht durch fossil befeuerte bzw. andere umwelt- und gesundheitsschädliche Kraftwerke ersetzt werden. Allerdings sind derzeit kaum valide Daten verfügbar, die den genauen Beitrag des Wegfalls dieser Emissionen in Hinblick auf die Minderung der Krankheitslast quantifizieren.

## 2.2.1 Gesundheitswirkungen

### Quecksilber

**17.** Das Schwermetall Quecksilber besitzt eine hohe humantoxikologische Relevanz (SRU 2008, Tz. 774 ff.). Quecksilber aus Kohlekraftwerken gelangt insbesondere über atmosphärische Emissionen und nasse Deposition in die Umwelt. Ein Teil der Quecksilberverbindungen kann sehr lange in der Atmosphäre verweilen, wird über weite Strecken transportiert und weiträumig verteilt (UBA 2016c). Von den Quecksilberemissionen, die jährlich in Deutschland freigesetzt werden (ca. 9,1 kt im Jahr 2015), werden etwa 25 % innerhalb der Grenzen Deutschlands deponiert, der Rest wird grenzübergreifend transportiert (ILYIN et al. 2016; UBA 2017d). Im europäischen Vergleich sind die Quecksilberkonzentrationen in der Luft und die Quecksilberdepositionen in Deutschland hoch (ILYIN et al. 2016). Aufgrund der Persistenz und Ubiquität des Schwermetalls spricht man auch von einem globalen Quecksilberkreislauf. Jeder punktuelle Eintrag und auch natürliche Quellen (Waldbrände, Vulkanausbrüche etc.) tragen zu diesem Kreislauf bei (UNEP 2008; SALOMON 2009).

**18.** Quecksilber, das auf die Böden und ins Wasser gelangt, wird zum Teil durch Mikroorganismen in organische Verbindungen (Methylquecksilber) umgewandelt. Diese Verbindungen können gut vom Organismus aufgenommen werden und haben bioakkumulative Eigenschaften. Die Humanexposition mit Quecksilber in Deutschland erfolgt, abgesehen vom zahnmedizinischen Einsatz von Amalgamverbindungen, primär über den Verzehr von Fisch, Muscheln und Krebsen, in denen sich organische Quecksilberverbindungen entlang der Nahrungskette angereichert haben (UBA 2016c).

Hinsichtlich der Wirkung des Schwermetalls auf den Menschen stehen chronische Effekte auf das Nervensystem und die fetale Entwicklung im Vordergrund. Methylquecksilber ist in der Lage, sowohl die Blut-Hirn-Schranke als

auch die Plazenta zu passieren. Insbesondere Säuglinge und Kleinkinder gelten als vulnerabel. Bei Kindern kann es aufgrund der erhöhten Quecksilberexposition während der fetalen Entwicklung zu neurokognitiven Einschränkungen kommen. Föten erweisen sich als besonders vulnerabel gegenüber einer chronischen Quecksilberexposition (SYVERSEN und KAUR 2014; DRASCH et al. 1994; CAROCCI et al. 2014).

Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) hat die duldbare wöchentliche Aufnahmerate (TWI – Tolerable Weekly Intake) für Methylquecksilber auf 1,3 µg/kg Körpergewicht festgelegt (EFSA 2012). Die Exposition über die Nahrung der europäischen Bevölkerung (Mediane des 95 % Perzentsils) liegen dicht am Richtwert oder überschreiten diesen sogar in einigen Fällen (s. a. SRU 2008, Tz. 774 ff.; UBA 2016c; EFSA 2012), sodass der Expositionsvermeidung über alle Expositionspfade im Sinne des vorsorgenden Gesundheitsschutzes eine besondere Bedeutung zukommt. Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) empfiehlt Schwangeren, auf den Verzehr von Fischarten mit besonders hohen Methylquecksilbergehalten wie Thunfisch zu verzichten (BfR 2008). Bei der Anreicherung von Quecksilber in Meeresfischen, insbesondere langsam wachsende Arten am Ende der Nahrungskette, spielt aber neben anthropogenen Einträgen auch das natürliche Vorkommen von Quecksilber in der Geosphäre bzw. anderen natürlichen Quellen eine wichtige Rolle. Für die weiterhin hohen Belastungen in Fischen, die in den großen Flussgebieten in Deutschland die Qualitätswerte der Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG zum Teil noch sehr deutlich überschreiten, sind insbesondere historische Einträge, die sich in den Sedimenten und Böden abgelagert haben und remobilisiert werden, verantwortlich (BMUB und UBA 2013; LAWA et al. 2016). Bei den Neueinträgen in die Oberflächengewässer spielt die atmosphärische Deposition (ca. 10 %) eine geringere Rolle als zum Beispiel Einträge aus urbanen Gebieten (ca. 30 %), durch Erosion (ca. 23 %) oder über das Grundwasser (ca. 18 %) (UBA 2017b).

**19.** Deutschland hat sich 2013 mit der Unterzeichnung der Minimata-Konvention der Vereinten Nationen verpflichtet, „die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor anthropogenen Emissionen und Freisetzungen von Quecksilber und Quecksilberverbindungen zu schützen“ (BMUB 2017). Die Konvention benennt als Minderungsmaßnahme auch die Regulierung der Emissionen von Anlagen. Die aktuellen Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken für Großfeuerungsanlagen vom 17. August 2017 (Tz. 61) enthalten Bandbreiten für Quecksilbergrenzwerte (BREF LCP 2016), die strenger sind, als der entsprechende derzeit in Deutschland gültige Wert.

**20.** Ein Ausstieg aus der Kohleverstromung wäre aus umwelt- und gesundheitspolitischer Sicht zu begrüßen, insbesondere da – bezogen auf den Luftpfad – die Kohleverstromung der Hauptemittent für anthropogen freigesetztes Quecksilber in Deutschland ist. Dieser Ausstieg kann – aufgrund des beschriebenen komplizierten Stoffkreislaufes – erst langfristig zu einer Abnahme der Belastung in Biota und somit auch der Humanbelastung beitragen, wäre aber darüber hinaus ein wichtiger Beitrag, um den grenzüberschreitenden Stofftransport zu mindern. Generell ist jegliche Reduzierung des Stoffeintrags wichtig, unter anderem da die Quecksilberaufnahme über die Nahrung in einigen Fällen schon sehr hoch ist (Tz. 18). Obwohl der Beitrag von aktuellen Quecksilberemissionen aus Kraftwerken für die Quecksilberbelastungen in den Gewässern und in Biota schwer quantifizierbar, aber eher gering ist (LAWA et al. 2016), gilt vor diesem Hintergrund das Minimierungsgebot im Sinne des vorbeugenden Gesundheitsschutzes.

### Stickstoffoxide

**21.** Die Luftbelastung mit Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ), insbesondere mit Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), stellt eine der großen aktuellen Herausforderungen der Luftreinhaltung dar. Die Emissionen aus Kohlekraftwerken tragen zur sogenannten  $\text{NO}_2$ -Hintergrundbelastung bei. Der Anteil der Hintergrundbelastung an der Gesamtbelastung (lokale Belastung plus Hintergrundbelastung) ist zum Teil recht hoch. So liegt dieser zum Beispiel an 27 Hauptverkehrsstraßen in Berlin bei circa 53 % (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt 2013). Allerdings dominiert gerade an solchen hochbelasteten Standorten der Verkehr als Hauptemittent sehr deutlich die lokale Immissionssituation, sowohl was den lokalen Beitrag als auch den urbanen Hintergrundanteil betrifft.

Die gesundheitlichen Wirkungen von  $\text{NO}_x$  sind gut dokumentiert, wobei  $\text{NO}_2$  als besonders wirksame Verbindung im Mittelpunkt steht (WHO 2013; EPA 2016; EEA 2013).  $\text{NO}_2$  ist ein Reizgas und gilt als sehr reaktives Oxidationsmittel. Seine relativ geringe Wasserlöslichkeit führt dazu, dass der Schadstoff nicht in den oberen Atemwegen gebunden wird, sondern in die tieferen Bereiche des Atemtraktes (Bronchiolen, Alveolen) eindringt. Dort kann  $\text{NO}_2$  Zellschäden auslösen, entzündliche Prozesse verursachen und zu einer Hyperreagibilität der Bronchien beitragen. Eine vorbestehende allergische Atemwegserkrankung ist ein Risikofaktor für eine Hyperreagibilität. Zudem können eine Reizung der Atemwege und eine chemische Veränderung von luftgetragenen Allergenen dazu beitragen, dass allergische Reaktionen auf zum Beispiel Pollen verstärkt werden (FRANZE et al. 2005; TUNNICLIFFE et al. 1994).

Umweltepide miologische Studien konnten Zusammenhänge zwischen  $\text{NO}_2$ -Belastung und Atemwegser-

krankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und einer erhöhten Mortalität nachweisen (WHO 2013; EPA 2016). Neuere Studien weisen auch auf Assoziationen mit Diabetes mellitus Typ II und einem niedrigen Geburtsgewicht hin (LAVIGNE et al. 2016; LIPFERT 2017). Dokumentiert wurde zudem ein Anstieg der Krankenhausaufnahmen aufgrund von chronischer Bronchitis und Asthma bronchiale infolge hoher  $\text{NO}_2$ -Belastungen (siehe z. B. OOSTERLEE et al. 1996; PERSHAGEN et al. 1995). Außerdem konnten eine verstärkte Reizwirkung von Allergenen, eine eingeschränkte Infektabwehr sowie ein vermindertes Lungenwachstum bei Kindern bei längerer Exposition gegenüber einer  $\text{NO}_2$ -Konzentration von 40 bis 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  beschrieben werden (WHO 2000). Aber auch bei Konzentrationen unterhalb von 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  wurden in einzelnen Fällen Atemwegssymptome bei Kindern nach Langzeitexpositionen beschrieben (NEAS et al. 1991). Insbesondere Personen mit Atemwegserkrankungen (z. B. Heuschnupfen, Asthma bronchiale und chronische Bronchitis) und Menschen mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen reagieren empfindlich auf eine  $\text{NO}_2$ -Exposition und sind daher – so wie auch Kinder – als besonders vulnerabel einzustufen (LANUV NRW 2010; KEHE und EYER 2013; KRAFT et al. 2005).

Der  $\text{NO}_2$ -Grenzwert der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/81/EC zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel. Vorläufige Auswertungen des Umweltbundesamtes (UBA) zeigen, dass er in Deutschland im Jahr 2016 noch an 57 % der verkehrsnahen Standorte überschritten wurde (UBA 2017g). Zudem können Stickstoffoxide die Bildung von bodennahem Ozon fördern und sind Vorläufersubstanzen für Feinstaub. Ozon ist ein Reizgas, was insbesondere die Schleimhäute angreift und so die Lungenfunktion und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen kann (LANUV NRW 2010).

Aufgrund der bestehenden Belastungssituation in Deutschland ist es generell wichtig,  $\text{NO}_2$ -Emissionen zu reduzieren. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung wäre ein Beitrag dafür, die gesundheitlichen Auswirkungen von  $\text{NO}_2$ -Belastungen zu mindern.

### Feinstaub

**22.** Obwohl Feinstaub überwiegend durch den Straßenverkehr verursacht wird, tragen auch Kohlekraftwerke zur Belastungslage bei, unter anderem durch die Bildung von Sekundärpartikeln aus  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen (Tz. 16; AMANN und WAGNER 2014). Feinstaubpartikel aus Kohlekraftwerken werden in großen Höhen freigesetzt und verteilen sich meist großräumig. Welchen Anteil diese Emissionen an den quellennahen Immissionen haben, ist sehr schwer quantifizierbar (PLAß und CONRAD 2017). Im Zusammenhang mit dem Braunkohletagebau wurden erste Abschätzungen von Fein-

staubanteilen aus der Kohlenutzung an Gesamtfeinstaubimmissionen an einzelnen Messstandorten vorgenommen, die auf Maximalwerte von 11 % kamen (Bezirksregierung Köln 2017).

Feinstäube können beim Menschen bis tief in die Lunge, Ultrafeinstäube (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 0,1 µm) sogar über die Blutbahn in weitere Körpergewebe eindringen (WHO 2013; 2000). Generell sind die Belastungen der Außenluft durch Feinstaub ein für alle Bevölkerungsgruppen relevanter Umweltisotikofaktor und führen – verglichen mit anderen Umweltstressoren – zu erwartbar hohen Krankheitslasten in Deutschland (PLAß und CONRAD 2017). Auch der SRU hat sich immer wieder mit den Gesundheitsbelastungen durch Feinstaub in der Atemluft beschäftigt und Empfehlungen für Maßnahmen zur Minderung der Immissionen gegeben (SRU 2000, Tz. 786, 808 und 1016; 2008; 2012).

Bei den gesundheitlichen Auswirkungen stehen Effekte im Bereich der Atemwege und des Herz-Kreislauf-Systems im Vordergrund (BEELEN et al. 2008; HOEK et al. 2013; RAASCHOU-NIELSEN et al. 2013; HORNBERG et al. 2013). Diese werden sowohl durch die Größe, die Form und die Anzahl der Partikel, als auch ihre chemischen Komponenten bzw. ihre Oberflächenbelastungen beeinflusst (siehe ausführlich SRU 2002, Tz. 550 ff.). Ein besonders hohes Wirkpotenzial besitzen Partikel aus Verbrennungsprozessen. Gesundheitliche Effekte von Außenluftverunreinigung durch Feinstaub sind bereits seit langem beschrieben und können sowohl durch kurz- als auch langfristige Expositionen verursacht sein (HEINRICH et al. 2002; PETERS et al. 2002; OSTRO 2004). Unter Feinstaubexpositionen kann es zudem zu Exazerbationen (= deutliche Verschlimmerung der Symptome) einer bereits bestehenden, in der Regel chronischen Erkrankung kommen. Beschriebene Effekte nach kurzfristigen Expositionen sind eine erhöhte Einweisungsrage in Krankenhausambulanzen bei Menschen mit vorbestehenden Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, aber auch eine erhöhte „vorgezogene“ Sterblichkeit durch Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen („harvesting“-Effekt). Langzeitexpositionen zeigten Zusammenhänge mit allgemeiner Schwächung und Müdigkeit bis hin zu chronischen Erkrankungen und Lungenkrebs (HEINRICH et al. 2002; PETERS et al. 2002; BEELEN et al. 2008; HOEK et al. 2013; RAASCHOU-NIELSEN et al. 2013). Besonders häufig wurde ein Zusammenhang zwischen Langzeitexpositionen und kardiopulmonalen Erkrankungen wie Herzinfarkt und Asthma dokumentiert (BEELEN et al. 2008; HOEK et al. 2013; RAASCHOU-NIELSEN et al. 2013; HORNBERG et al. 2013; PLAß und CONRAD 2017). Neuere Untersuchungen geben Hinweise, dass Feinstaubbelastungen des Weiteren mit neurodegenerativen Erkrankungen

(Alzheimer) und Diabetes mellitus assoziiert sind (HE et al. 2017; WU et al. 2015). Als besonders vulnerabel gegenüber Feinstaubexpositionen erwiesen sich Personen mit vorbestehenden Atemwegserkrankungen (z. B. Asthma bronchiale oder chronischer Bronchitis) und Kinder (PLAß und CONRAD 2017).

Von Kohlekraftwerken werden auch die besonders gesundheitsrelevanten Ultrafeinstäube emittiert (siehe u. a. KANG et al. 2011). Bisher sind Ultrafeinstäube in der Außenluft in Bezug auf ihre klinische, toxikologische und umwelthygienische Bedeutsamkeit nicht ausreichend erforscht (HORNBERG et al. 2013; HAHN 2017). Hier besteht besonderer Forschungsbedarf, da einzelne neuere Studien auf ihre besondere Bedeutung für die menschliche Gesundheit, insbesondere hinsichtlich der Entstehung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Schlaganfallerkrankungen, hinweisen. Die Masse solcher Partikel in der Atemluft ist im Verhältnis zu größeren Partikeln sehr klein. Ihre Expositionskonzentrationen werden deshalb durch die derzeit gültigen Grenzwerte, die sich auf die Masse beziehen, nicht adäquat erfasst. Für die Bewertung von Feinstäuben reicht – bedingt durch die Kleinheit und Variabilität der Partikel und/oder Aerosolfraktionen – zudem eine massenbezogene Risikoabschätzung nicht aus, vielmehr müssen Teilchenanzahl sowie die Beladungen der Partikeloberfläche mit kanzerogenen, kokanzerogenen und allergenen Stoffen stärker als bisher berücksichtigt werden.

Derzeit liegen zahlreiche nationale und internationale statistisch epidemiologische Abschätzungen der gesundheitlichen Wirkungen unterschiedlicher Feinstaubfraktionen vor. Zukünftig gilt es, die Expositionen und gesundheitlichen Wirkungen verstärkt aus umwelthygienischer, umwelttoxikologischer und klinischer Sicht zu charakterisieren, um zu erhärten, dass die gewählten Indikatoren ausreichend spezifisch und punktgenau für die Mortalität und Krankheitslast von Feinstaubbelastungen sind (HAHN 2017).

### Fazit

**23.** Die negativen gesundheitlichen Wirkungen von Stickstoffoxiden, Quecksilber sowie Feinstaub auf die menschliche Gesundheit sind gut belegt. Es fehlen für Deutschland allerdings valide Untersuchungen zur Quantifizierung der Krankheitslasten durch die Schadstoffbelastungen, die den Emissionen von Kohlekraftwerken zugeschrieben werden können (PLAß und CONRAD 2017). Insbesondere mangelt es an Abschätzungen, welchen Beitrag die derzeitigen Emissionen aus Kohlekraftwerken zu konkreten Immissionssituationen beitragen (PREISS et al. 2013; PLAß und CONRAD 2017). Dabei sollte berücksichtigt werden, dass Luftschadstoffe als Gemisch und nicht einzeln auftreten. Zweifelsohne

würde aber ein Ausstieg aus der Kohleverstromung die Emissionsbelastung mindern und hat somit das Potenzial, zur Senkung von Krankheitslasten beizutragen.

### 2.2.2 Umweltwirkungen von Stickstoffoxiden

**24.** Insbesondere die Stickstoffoxidemissionen der Kohlekraftwerke belasten auch die Umwelt. Deutschland überschreitet immer noch die von der NEC-Richtlinie 2001/81/EC vorgegebenen nationalen Emissionshöchstmengen für Stickstoffoxide (EEA 2017). Allerdings wurden Korrekturen am Emissionsinventar geltend gemacht, die – wenn sie von der Europäischen Umweltagentur (European Environment Agency – EEA) anerkannt werden – zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen führen werden (Deutscher Bundestag 2016). Diese Emissionen haben negative Auswirkungen auf terrestrische und aquatische Ökosysteme, indem sie zur Überdüngung (Eutrophierung) und Versauerung beitragen. Letzteres gilt auch für Schwefeldioxidemissionen. Vor allem die Eutrophierung ist weiterhin eine große Herausforderung für den Schutz der Biodiversität in Deutschland (SRU 2015b). So sind für etwa 48 % der empfindlichen terrestrischen Ökosysteme (z. B. Moorheiden, Sümpfe und Torfmoore) die Belastungsgrenzen (Critical Loads) für eutrophierende Luftschadstoffe überschritten (SCHAAP et al. 2014). Für die Versauerung betrifft dies noch 8 % dieser Ökosysteme. Die Eutrophierung führt zu einem Verlust an nährstoffarmen Lebensräumen, verbunden mit einem Rückgang oder sogar Verlust der dort vorkommenden typischen Arten. Eine Zunahme von stickstoffliebenden Pflanzen geht einher mit einer Verdrängung von an nährstoffarme Bedingungen angepasste Arten. Diese Stickstoffmangelanzeiger machen 70 % der Gefäßpflanzen auf der Roten Liste Deutschlands aus (LAI 2012).

**25.** Stickstoffeinträge aus der Luft tragen neben den Einträgen aus den Flüssen, die insbesondere aus der Landwirtschaft stammen und die Belastungslage dominieren, zur Überdüngung von Nord- und Ostsee bei (SRU 2015b). So stammen 33 bzw. 22 % der Stickstoffeinträge in diese Randmeere aus der atmosphärischen Deposition. In unseren heimischen Meerestgewässern ist oftmals Stickstoff der wichtigste Nährstoff für das Algenwachstum. Durch den übermäßigen Nährstoffeintrag nimmt das Wachstum von Mikroalgen zu und das gesamte Nahrungsnetz verändert sich. Als indirekte Wirkung der Überdüngung kommt es zu einer zunehmenden Wassertrübung, was ebenfalls die Artenzusammensetzung verändert. So ist der Rückgang von Seegraswiesen, eine Zunahme an Algenblüten im Wattenmeer und die Ausbildung von sauerstoffarmen bzw. -freien Zonen in den Tie-

fen der Ostsee insbesondere eine Folge des übermäßigen Eintrags von Stickstoff in Nord- und Ostsee. Dies ist eine wichtige Ursache dafür, dass der gute Umweltzustand, der im Rahmen der Umsetzung der europäischen Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie 2008/56/EG angestrebt wird, verfehlt wird (HELCOM 2014; NARBERHAUS et al. 2012; WOLFF et al. 2010). Ebenso erreichen fast alle Übergangs- und Küstengewässer der deutschen Nord- und Ostsee aufgrund von Eutrophierungseffekten keinen guten ökologischen Zustand nach Wasserrahmenrichtlinie (BMUB und UBA 2013). Der Ausstieg aus der Kohleverstromung wäre daher ein signifikanter Beitrag, um die Eutrophierung der terrestrischen und aquatischen Ökosysteme durch die Einträge von Stickstoffoxiden zu mindern.

## 2.3 Energiewirtschaftliche Vorteile

**26.** Bei einem auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromsystem werden sich Zeiten eines großen mit Zeiten eines geringen Stromangebots abwechseln. Das Stromsystem muss aus diesem Grund darauf ausgerichtet werden, große Mengen fluktuierende erneuerbare Energien zu integrieren. In naher Zukunft werden daher im konventionellen Bereich ausschließlich flexible Kraftwerke benötigt, die zur Deckung einer stark schwankenden Residuallast beitragen können. Die emissionsärmeren und zumeist flexibleren Gaskraftwerke wurden aber in den letzten Jahren in Deutschland und Europa aufgrund der vergleichsweise hohen Brennstoffpreise von den günstigeren Stein- und besonders Braunkohlekraftwerken zunehmend vom Strommarkt gedrängt. Verstärkt wird diese Problematik durch die derzeit sehr niedrigen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise im europäischen Emissionshandel, die emissionsintensive Kraftwerke begünstigen. Dies ist nicht nur aus klimapolitischer Sicht problematisch, sondern auch im Hinblick auf die benötigte Flexibilität im Stromsektor (SRU 2015a). Durch das Abschalten von Kohlekraftwerken kann sich die Auslastung der Gaskraftwerke wieder erhöhen, was eine bessere Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien ermöglicht (Agora Energiewende 2016b).

**27.** Eine weitere klimapolitische Herausforderung ist die Emissionsreduktion im Verkehrs- und Wärmesektor, die durch eine verstärkte Nutzung von Strom in diesen Sektoren erzielt werden soll. Dies kann jedoch nur gelingen, wenn der verwendete Strom bereits CO<sub>2</sub>-arm oder im Idealfall CO<sub>2</sub>-frei erzeugt wird (KUNZ und MAIER 2017). Es gilt somit zu verhindern, dass der steigende Strombedarf des Verkehrs- und Wärmesektors zu einer Mehrauslastung von Kohlekraftwerken und damit zu

einer sektoralen Emissionsverschiebung führt. Ein unverzüglicher, strukturierter Ausstieg aus der Kohleverstromung ist daher eine notwendige Vorbedingung für

eine im Sinne des Klimaschutzes erfolgreiche Sektorkopplung mit dem Verkehrs- (SCHILL und GERBAULET 2015) und dem Wärmesektor (ECKE et al. 2017).

## 3 Herausforderungen eines Kohleausstiegs

**28.** Bisher hat die Bundesregierung keine klare Position zur Beendigung der Kohleverstromung eingenommen, noch weniger sind konkrete Maßnahmen oder ein Ausstiegspfad aufgezeigt worden. Diese sind jedoch notwendig, um für Unternehmen und Gesellschaft Richtungssicherheit und Vertrauen in die Energiewende herzustellen. Nur so können die betroffenen Branchen und Regionen einen klaren zeitlichen Rahmen zur Planung und Umsetzung der notwendigen strukturellen Entwicklungen erhalten. Die gesellschaftliche Diskussion über die Rolle und Zukunft der Atomkraft hat die nationale Energiepolitik über Jahrzehnte gelähmt, bis ein Ausstiegskonsens erreicht werden konnte. Aus dieser Erfahrung heraus sollte die Bundesregierung die Diskussion zum Ausstiegspfad für die Kohle aktiv gestalten und anstreben, einen sozial- und wirtschaftsverträglichen Konsens zu finden, der das langfristige Ziel der Klimaneutralität der Stromversorgung im Auge behält (s. Abschn. 4.1.4; SRU 2015a). Im folgenden Kapitel werden verschiedene Herausforderungen eines Ausstiegs aus der Kohleverstromung dargestellt. Diese lassen sich in konkrete Auswirkungen auf die Standorte, die Strukturentwicklung in den betroffenen Regionen sowie die Sicherstellung der Versorgungssicherheit unterscheiden.

### 3.1 Auswirkungen auf Kraftwerke und Tagebaue

#### 3.1.1 Braunkohleindustrie in Deutschland

**29.** Neben Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen hat das Ende der Kohleverstromung in Deutschland vielfältige regionale und sektorale Verteilungseffekte zur Folge, die beim Ausgestaltungprozess einbezogen werden müssen. Im Hinblick auf die Braunkohle wären in Deutschland sowohl die Kraftwerke als auch die Tagebaue von der Schließung betroffen. Braunkohle wird in Deutschland in drei Revieren abgebaut: dem Rheinischen Revier bei Köln, dem Mitteldeutschen Revier bei Leipzig und dem Lausitzer Revier bei Cottbus (s. Abb. 3). Im Helmstedter Revier wurde mit dem Kraftwerk Buschhaus

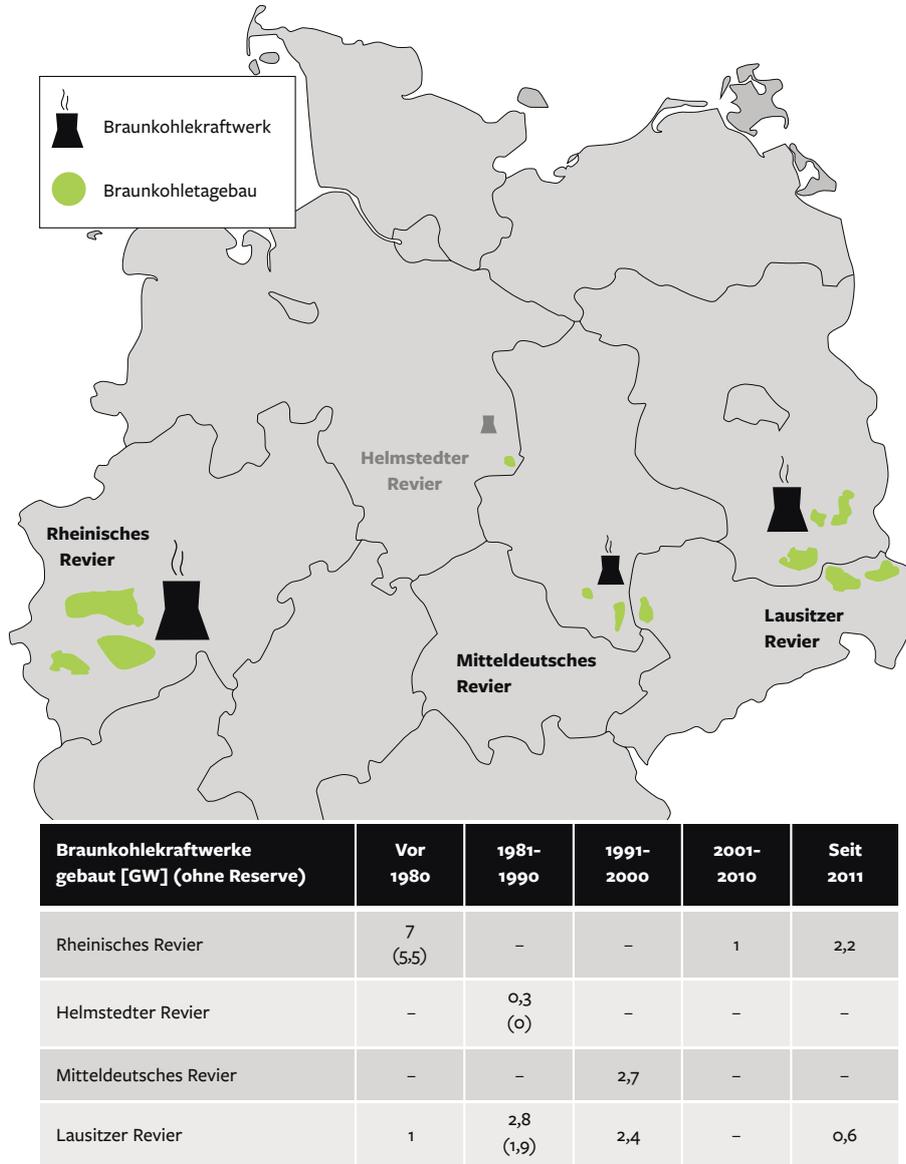
im September 2016 das letzte Kraftwerk aus dem Regelbetrieb genommen. Zeitgleich wurde auch der dortige Kohleabbau aus dem letzten dann ausgekohlten Tagebau Schöningen beendet (OEI et al. 2016). Während im Rheinischen Revier ein Großteil der Kraftwerke vor 1980 errichtet wurde, ist die Mehrzahl der Anlagen in Ostdeutschland in den 1980er- und 1990er-Jahren ans Netz gegangen. Die ostdeutschen Kraftwerke aus den 1980er-Jahren besitzen gegenüber den westdeutschen Anlagen aus den 1970er-Jahren nur einen leicht höheren Wirkungsgrad (Öko-Institut 2017). Für Anlagen, die nach 1990 in Deutschland in Betrieb genommen wurden, lässt sich eine eindeutige Korrelation zwischen dem Anlagenalter und dem Wirkungsgrad feststellen. Ältere Kraftwerke haben einen geringeren Wirkungsgrad und emittieren daher mehr CO<sub>2</sub> pro erzeugter MWh Strom. Diese unterschiedlichen Alterskohorten beeinflussen auch die anstehenden Struktureffekte für die Regionen, wenn die Anlagen basierend auf ihrem Alter oder ihrer CO<sub>2</sub>-Intensität abgeschaltet werden sollen. Daher wurden von der Bundesregierung bei der Kraftwerksauswahl für die Sicherheitsbereitschaft bewusst nicht nur das Alter der Kraftwerke, sondern auch die regionalen Auswirkungen einbezogen (GERBAULET et al. 2012; OEI et al. 2014; Agora Energiewende 2016a; MATTHES et al. 2017; HORST et al. 2015).

Braunkohlekraftwerke produzieren neben Strom (142 TWh pro Jahr) auch in deutlich geringerem Umfang Wärme (17 TWh). Mehr als zwei Drittel dieser Wärme (12 TWh) wird hierbei durch kleinere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) produziert. Im Rahmen des Kohleausstiegs muss diese Wärme durch CO<sub>2</sub>-ärmere Technologien an den Standorten ersetzt werden (MATTHES et al. 2017; Öko-Institut 2017; Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015).

**30.** Im März 2017 hat das Unternehmen LEAG im Rahmen der Vorstellung eines neuen Revierkonzeptes für die Lausitz angekündigt, ursprünglich geplante neue Tagebaue in Jänschwalde Nord, Bagenz-Ost, Spremberg-Ost sowie Teile von Nochten 2 nicht zu eröffnen. Als Grund hierfür wurden die „zwischenzeitlich eingetretenen bundespolitischen und wirtschaftlichen Rahmenbedin-

o **Abbildung 3**

Braunkohlekraftwerke und Tagebaue in Deutschland



Die Zahlen in Klammern sind die verbleibenden Kapazitäten nach Einführung der Sicherheitsbereitschaft. Im Helmstedter Revier wurden im September 2016 das letzte verbliebene Kraftwerk sowie der dazugehörige Tagebau aus dem Regelbetrieb genommen.

SRU 2017; Datenquelle: Bundesnetzagentur 2017

ungen“ genannt („LEAG legt Revierkonzept für die Lausitz vor“, Pressemitteilung der Lausitz Energie Bergbau AG vom 30. März 2017). Allerdings ist weiterhin geplant, das Sonderfeld Mühlrose im Tagebau Nochten 2 aufzuschließen, wodurch eine Umsiedlung von ungefähr 200 Personen zur Förderung von 150 Mio. t Braunkohle notwendig wird. Eine finale Entscheidung bezüglich eines möglichen Aufschlusses des Tagebaus Welzow-Süd TF II und der damit verbundenen Umsiedlung von 810 Personen will das Unternehmen bis 2020 treffen. Berechnungen zeigen allerdings auf, dass bei Einhaltung der Klimaschutzziele der Abbau der bereits genehmigten

Kohlemengen in den existierenden Tagebauen ausreicht, um die Braunkohlekraftwerke bis zu ihrer Schließung zu versorgen (GERBAULET et al. 2012; OEI et al. 2014; 2017; Öko-Institut 2017; HERMANN et al. 2017; MATTHES et al. 2017). Somit sind die geplanten neuen Erschließungen bzw. Erweiterungen bestehender Tagebaue in der Lausitz (Nochten 2 und Welzow Süd TF II) und Mitteldeutschland (Vereinigtes Schleenhain) nicht erforderlich. Da die bereits genehmigten Kohlemengen in Nordrhein-Westfalen bei der Einhaltung der Klimaziele die noch benötigten Mengen deutlich überschreiten, sollten die Tagebaue Garzweiler II und Hambach

zudem weiter verkleinert werden. Damit könnte die Umsiedlung von Dörfern und die weitere Zerstörung von Landschaften mit ihren negativen sozialen und ökologischen Effekten vermieden werden.

### 3.1.2 Steinkohleindustrie in Deutschland

**31.** Die in Deutschland verstromte Steinkohle wird praktisch vollständig aus Kolumbien, Südafrika und Russland importiert (Deutscher Bundestag 2014). Aus dem Klimaabkommen von Paris folgt die Notwendigkeit, auch weltweit den Kohleausstieg einzuleiten. Sowohl der Kohleausstieg in Deutschland als auch in anderen Ländern hat unweigerlich soziale Auswirkungen in den Förderländern (OEI und MENDELEVITCH 2016), die jedoch in dieser Stellungnahme nicht betrachtet werden. Ebenfalls nicht Teil der Stellungnahme sind die Gesamtökobilanzen der Kohleverstromung sowie die vielfältigen ökologischen und gesundheitlichen Wirkungen des Steinkohleabbaus in den Exportländern (HARRIS et al. 2016; SCHÜCKING 2013). Der Fokus liegt ausschließlich auf der Kohleverstromung in Deutschland und den Regionen mit Braunkohletagebauen.

Die in den letzten beiden Steinkohlebergwerken (Prosper-Haniel und Ibbenbüren) geförderte Steinkohle wird zu großen Teilen von industriellen Verbrauchern abgenommen. Das Auslaufen der Steinkohlesubventionen wird zur Folge haben, dass die verbliebenen Steinkohlezechen bis zum Jahr 2018 geschlossen werden, weil unsubven-

tionierte deutsche Steinkohle am Weltmarkt nicht konkurrenzfähig ist.

Der Kohleausstieg in Deutschland betrifft daher bei der Steinkohle in erster Linie die Kraftwerksstandorte. Die Mehrheit der Steinkohlekraftwerke in Deutschland befindet sich in Nordrhein-Westfalen, an der Nordseeküste sowie entlang von Flüssen in Baden-Württemberg. Eine Vielzahl von Unternehmen, wie beispielsweise die Steag, RWE, Uniper, EnBW, Vattenfall, ENGIE, GKM sowie zahlreiche Stadtwerke, betreiben Steinkohlekraftwerke in Deutschland. Deshalb ist der Ausstieg aus der Steinkohle in Deutschland nicht so konzentriert. Zudem betrifft er weniger Arbeitsplätze als bei der Braunkohle und kann somit leichter ausgeglichen werden (siehe Abschn. 3.2.1; HERMANN et al. 2017).

### 3.1.3 Veränderungen des Angebotes der Kraftwerksnebenprodukte Aschen und Gips

**32.** Kohlekraftwerke produzieren neben Strom und Wärme Reststoffe, die entweder verwertet oder aber als Abfälle beseitigt werden (Tab. 3).

Aschen, Schlacken und Gips werden – bei entsprechender Qualität – in der Baustoffindustrie, im Straßen- und Wegebau sowie zur Verfüllung eingesetzt (BRIESE et al. 2014). Mit der Stilllegung von Kraftwerken wird das Angebot an geeigneten Materialien erheblich sinken.

#### o Tabelle 3

Produktion und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten aus Kohlekraftwerken in Deutschland im Jahr 2014

Kapazität (MW <sub>th</sub> )	Steinkohle		Braunkohle		
	69.406		68.900		
Verfeuerte Kohle (Mio. t)	44		163		
Nebenprodukt	Erzeugung	Verwendung	Erzeugung	Verwendung	
	Mio. t	%	Mio. t	Tagebau	Sonstige
				%	%
Schmelzkammergranulat	0,75	100	–	–	–
Kesselasche/Kesselsand	0,37	98	1,81	99	1
Flugasche	3,10	96	9,08	99	1
Wirbelschichtasche	0,31	85	0,26	96	3
REA <sup>1</sup> -Gips	1,66	99	5,15	11	89
SAV <sup>2</sup> -Produkt	0,28	100	–	–	–
<b>Gesamt</b>	<b>6,47</b>	<b>97</b>	<b>16,30</b>	<b>71</b>	<b>29</b>

<sup>1</sup> Rauchgasentschwefelungsanlage

<sup>2</sup> Sprühabsorptionsverfahren

Quelle: VGB Powertech 2017

In Deutschland fielen 2014 etwa 3,8 Mio t Steinkohleaschen und etwa 11 Mio. t Aschen aus Braunkohlekraftwerken an (Tab. 3) (VGB Powertech 2017). Vor allem Steinkohleflugaschen werden als hochwertiger Bestandteil bzw. Zuschlagstoff in Zement und Beton eingesetzt. Braunkohleaschen gelangen als Verfüllmaterial hauptsächlich zurück in den Tagebau. Die abnehmenden Mengen verursachen jedoch voraussichtlich keine schwerwiegenden Mangelsituationen: Steinkohleflugaschen lassen sich mittelfristig durch Kalkstein, Hüttensande und andere mineralische Stoffe ersetzen. Da der Bedarf an Kalkstein für die Rauchgasreinigung mit fortschreitendem Kohleausstieg sinken wird, können die frei werdenden Mengen im Bausektor als Ersatz für die Flugaschen genutzt werden (SCHWARZKOPP et al. 2016). Der Bedarf an Verfüllmaterial im Tagebau sinkt parallel zum Auslaufen der Braunkohleförderung.

Seit den 1980er-Jahren ist die Rauchgasreinigung in Kohlekraftwerken verpflichtend. Als Nebenprodukt der Rauchgasentschwefelung fallen erhebliche Mengen an synthetischen Calciumsulfatverbindungen an, sogenannter REA-Gips (Rauchgasentschwefelungsgips). Dieser hochreine Gips wird zusammen mit Naturgips, der in Deutschland zumeist im Tagebau gewonnen wird, zu Bauprodukten verarbeitet.

In Deutschland entstanden 2014 6,8 Mio. t an REA-Gips, der überwiegende Teil davon in Braunkohlekraftwerken (Tab. 3; VGB Powertech 2017). Zusätzlich werden jährlich 4,5 Mio. t Naturgips und Anhydritstein (ebenfalls eine Calciumsulfatverbindung) im Tagebau gewonnen. Von insgesamt 11,3 Mio. t Gips wird der größte Anteil im Bausektor für Bauprodukte und die Zementherstellung genutzt. Etwa 2,3 Mio t Gips werden derzeit exportiert (SCHWARZKOPP et al. 2016).

Mit dem Kohleausstieg wird mittelfristig eine Angebotslücke an Gips entstehen. Prinzipiell kann der Markt darauf mit Substitution durch veränderte Bauweisen und -materialien aber auch durch Angebotsdiversifizierung reagieren. Eine Reduktion der inländischen Gipsherstellung im Rahmen der Rauchgasentschwefelung kann zu einem Rückgang der Exporte, dem zusätzlichen Abbau von Naturgips oder auch einer erhöhten Nachfrage nach Recyclinggips führen. Aus Gründen der Rohstoffschonung und des Naturschutzes sowie entsprechend den Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist die Rückgewinnung von Gips aus Gipsabfällen von großer Bedeutung. Da notwendige Vorbedingungen – funktionierende Technik, Aufbereiter, Abnehmer – bereits erfüllt sind, bleibt die Aufgabe, die Etablierung von Recycling-Gips im Markt aktiv zu unterstützen. Parallel gilt es, auch die Grundlagen für höhere Mengenpotenziale an Recyclinggips hoher Qualität zu legen. Dies erfordert eine sortenreine Erfassung

am Entstehungsort durch einen gezielten Rückbau in Abrissobjekten und für die Zukunft einen Einbau, der den Rückbau bereits mit berücksichtigt. Gipsabfälle müssen zudem auf kurzem Wege in Recyclinganlagen gelangen statt in preiswerte Scheinverwertungen, wie zum Beispiel bei der Stabilisierung von Uranschlammteichen in Tschechien oder der Verfüllung von Steinbrüchen (BUCHERT et al. 2017).

Auch wenn durch Abnahme und Wegfall von Kraftwerksnebenprodukten wie Steinkohleflugaschen oder REA-Gips voraussichtlich keine dramatische Mangelsituation auf der Nachfrageseite entstehen wird, steht die Branche – aber auch die Politik – vor der Aufgabe, die möglichen Alternativen bezüglich ihrer Nachhaltigkeit zu prüfen und entsprechend zu flankieren.

#### 3.1.4 Haftung für die Folgekosten der Braunkohletagebaue

**33.** Ein wichtiger Aspekt des Braunkohleausstiegs ist es, die Finanzierung der Folgekosten des Kohlebergbaus sicherzustellen. Seit der Wiedervereinigung bis zum Jahr 2017 wurden über 10 Mrd. Euro von Bund und Ländern für die Sanierung der Altlasten der früheren DDR-Tagebaue aufgewandt. Die Mittel fließen in die eigens hierfür gegründete Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungs-GmbH (LMBV). Weitere 1,23 Mrd. Euro wurden für den Zeitraum 2018 bis 2022 seitens des Bundes und der ostdeutschen Braunkohleländer Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen genehmigt (LMBV 2017). Neben diesen Altlasten aus der DDR-Zeit wird die Wiedernutzbarmachung von ehemaligen Tagebauen durch die entsprechenden Betreiber finanziert. Je nach Durchführung umfasst der im Folgenden verwendete Oberbegriff der Wiedernutzbarmachung die Renaturierung, die Rekultivierung oder auch die völlige Neugestaltung von Landschaften. Die dafür erforderlichen Mittel wurden in der Vergangenheit durch den laufenden Betrieb der Kohletagebaue und -kraftwerke erwirtschaftet. Aufgrund des erforderlichen Kohleausstiegs muss daher geprüft werden, ob noch ausreichend Mittel bei den Betreibern verbleiben, um weiterhin für alle Folgekosten der Kohleverstromung aufzukommen. Besonderheiten dieser Folgekosten sind:

- Ein Großteil der Kosten fällt erst bei der Wiedernutzbarmachung der Tagebauflächen und somit in der Zukunft an. Während die Umschichtung der Erdmassen bereits parallel zum Betrieb des Tagebaus beginnt, fallen die Kosten für mögliche Restseen über einen Zeitraum von bis zu fünfzig Jahren an (Öko-Institut 2017). Dies kann bedeuten, dass das Bergbauunternehmen zu diesem Zeitpunkt keine Erträge mehr durch

die Kohleverstromung einbringt, da bereits alle Kraftwerke stillgelegt sind.

- Einige Kosten, wie die Sicherstellung einer ausreichend guten Wasserqualität in den künstlich angelegten Seen und die zum Teil dauerhafte Grundwasserabsenkung durch Pumpen, werden auch nach der vollständigen Wiedernutzbarmachung bestehen bleiben und stellen daher langfristige Folgekosten dar. Letzteres liegt daran, dass in einigen Regionen Gebäude unterhalb des ursprünglichen Grundwasserspiegels gebaut wurden.
- Die genaue Höhe der Kosten und der Zeitpunkt, zu dem sie anfallen, sind noch unklar. Für die Bundesregierung sind diese Aspekte aufgrund fehlender Einsicht in unternehmensinterne Unterlagen daher schwer abzuschätzen.

**34.** Die Bergbauunternehmen sind rechtlich verpflichtet, vollständig für alle anfallenden Kosten aufzukommen. Für diesen Zweck müssen sie bereits während des laufenden Tagebaubetriebs detaillierte Pläne für die Nachnutzung erstellen. Basierend auf diesen Plänen schätzt das Unternehmen die zukünftig anfallenden Kosten. Um diese zu decken werden jedes Jahr entsprechende Rückstellungen auf der Passivseite der Geschäftsbilanzen gebildet. Die bis Ende 2016 gebildeten Rückstellungen belaufen sich auf 2,8 Mrd. Euro für RWE und 1,5 Mrd. Euro für die LEAG sowie (Stand: Ende 2015) 0,14 Mrd. Euro für die Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) (Bundesanzeiger 15.11.2016; 28.12.2016; 23.05.2017). Der Wert der Rückstellungen muss durch entsprechende Anlagen auf der Aktivseite abgesichert sein. Die Anlagen sind in der Regel Investitionen in konkrete Infrastrukturprojekte, wie beispielsweise Kraftwerksanlagen oder auch Fördergeräte in den Tagebauen. Verlieren diese Anlagen durch Wertabschreibungen oder Abnutzungen an Wert, müssen die Unternehmen zusätzliche Aktivposten in den Bilanzen nachweisen, damit die Rückstellungen ausreichend gesichert sind.

**35.** Hinsichtlich der Deckung der Kosten für die Wiedernutzbarmachung ergeben sich somit die folgenden möglichen Risiken:

- Die gebildeten Rückstellungen sind zu niedrig, um die Kosten der Wiedernutzbarmachung zu finanzieren. Dies kann daran liegen, dass die Kosten unterschätzt, die angenommenen Zinssätze für die Verzinsung der gebildeten Rückstellungen überschätzt oder der Zeitpunkt, zu dem die Kosten anfallen, bereits früher eintritt als erwartet. Das Bergbauunternehmen müsste in diesem Fall zusätzliche Mittel aufbringen, um die Rückstellungen zu erhöhen und die Mehrkosten zu tragen.

- Der reale Wert der Aktivposten entspricht nicht dem Buchwert der gebildeten Rückstellungen. Dies droht insbesondere, wenn ein Teil der Rückstellungen in konventionelle Kraftwerksanlagen oder in die Tagebauinfrastruktur investiert wurde. So mussten viele große Energieversorgungsunternehmen in den letzten Jahren bereits zusätzliche Abschreibungen vornehmen, weil der reale Wert dieser Anlagen deutlich unterhalb der in den Büchern hinterlegten Summen lag (OSTER und ERDMANN 2017; CALDECOTT et al. 2017). Im Fall weiterer Abschreibungen müsste das Bergbauunternehmen zusätzliche Aktivposten aufführen, um die Rückstellungen zu finanzieren.

Diese Risiken können dazu führen, dass das Bergbauunternehmen zu einem späteren Zeitpunkt noch weitere (ungeplante) Gelder zur Verfügung stellen muss. Ist das Unternehmen hinreichend liquide, um diese Mehrkosten zu tragen, werden keine öffentlichen Gelder für die Wiedernutzbarmachung benötigt. Eine Gefahr besteht jedoch, wenn das Bergbauunternehmen zu dem Zeitpunkt des Anfallens zusätzlicher Kosten eine ungenügende Liquidität aufweist oder nicht mehr existiert. Handelt es sich hierbei um ein Tochterunternehmen eines größeren Konzerns, haftet dieser grundsätzlich für die zusätzlichen Kosten. Allerdings können sich Mutterunternehmen durch gesellschaftliche Umstrukturierungen, wenn entsprechende Gewinnabtretungsverträge zwischen den Firmen vorher bereits gekündigt wurden, aus der rechtlichen Verantwortung ziehen (WRONSKI et al. 2016; OEI et al. 2017). So könnte die Struktur des tschechischen Mutterunternehmens Energetický a průmyslový holding a.s. (EPH), das über diverse weitere Tochtergesellschaften und Holdings Eigentümer der LEAG und der MIBRAG ist, die Haftung erschweren (OEI et al. 2017; Öko-Institut 2017; Greenpeace 2017). Analysen des Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS) (WRONSKI et al. 2017) zeigen, dass auch die Haftungsfrage in Nordrhein-Westfalen durch die Ausgliederung von innogy aus RWE komplizierter geworden ist. So wäre innogy – für den Fall einer Insolvenz von RWE – nicht für mögliche Forderungen aus den Kohle- oder Atomfolgekosten verantwortlich. Um sicherzustellen, dass das Verursacherprinzip gilt, wären daher zusätzliche politische Maßnahmen notwendig.

**36.** Tabelle 4 zeigt basierend auf einer Studie von FÖS und IASS (Institute for Advanced Sustainability Studies) (WRONSKI et al. 2016) eine Übersicht über mögliche Probleme bei der Haftung für die langfristigen Folgekosten des Braunkohleabbaus sowie passende Lösungsansätze. Hierbei wird deutlich, dass es aufgrund fehlender unabhängiger und öffentlich zugänglicher Kostenschätzungen bisher starke Informationsasymmetrien zulasten der öffentlichen Hand (und der Zivilgesell-

o **Tabelle 4**

Mögliche Probleme und Lösungen bei der Haftung für die langfristigen Folgekosten des Braunkohleabbaus

Mögliches Problem	Denkbare Lösung	Resultierende Folgewirkung
Höhe der Rückstellungen ist unzureichend	unabhängiges öffentliches Kostengutachten	Aufstockung der Rückstellungen
Realer Wert der gebildeten Rückstellungen ist zu niedrig	regelmäßige unabhängige Überprüfungen	Aufstockung der Aktivposten zur Deckung der Rückstellungen
Bergbauunternehmen wird insolvent	Sicherheitsleistungen oder Sicherungsvermögen („interner Fonds“)	Zusätzliche Sicherungslösung innerhalb des Unternehmens
Kündigung von (Gewinnabführungs-) Verträgen zum Mutterunternehmen	Bürgschaften vom Mutterunternehmen	Haftung durch das Mutterunternehmen wird sichergestellt
Mutterunternehmen wird insolvent	öffentlich-rechtlicher Fonds oder die Gründung einer privatrechtlichen Stiftung	Absicherung durch zusätzliche externe Sicherungslösungen

SRU 2017; Datenquelle: WRONSKI et al. 2016

schaft) gegenüber den Betreibern gibt. Erste Untersuchungen in einzelnen Bundesländern zielen daher darauf ab, erstens die Folgekosten der Braunkohletagebaue und zweitens die Haftbarkeit der Bergbauunternehmen und ihrer Mutterkonzerne besser abschätzen zu können. Die Ergebnisse dieser unabhängigen Untersuchungen sollten öffentlich zugänglich gemacht werden, damit die Gesellschaft die zu erwartenden Kosten und die Haftungsfrage besser einschätzen kann. Abhängig von den Ergebnissen müssten gegebenenfalls zusätzliche Sicherheiten von den Bergbauunternehmen verlangt werden (WRONSKI et al. 2016; OEI et al. 2017). In diesem Fall könnte auch auf die jüngsten Vorgaben aus den Entscheidungen zur Sicherung der Atomrückstellungen zurückgegriffen werden (von HIRSCHHAUSEN et al. 2015).

### 3.2 Strukturentwicklung in den Kohleregionen

**37.** Wenn die Kohleverstromung zurückgeht, wird regional ein Strukturwandel beschleunigt, der auch mit Arbeitsplatzverlusten in den betroffenen Branchen einhergeht. Es ist nötig, diesen Wandel sozialverträglich zu gestalten und durch neue Arbeitsplätze in der Energiewirtschaft oder anderen Branchen zu kompensieren. Hervorzuheben ist, dass ein solcher Strukturwandel in seiner Größenordnung historisch nicht außergewöhnlich ist und dass Deutschland bereits gravierendere Strukturveränderungen erfolgreich bewältigen konnte. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass einige Regionen in den ostdeutschen Bundesländern zum zweiten Mal betroffen sind, da bereits im Zuge der Wiedervereinigung die Anzahl der Beschäftigten in der Kohlewirtschaft stark zurückgegangen ist. Aus den Erfahrungen der Vergangen-

heit, wie beispielsweise der Wiedervereinigung aber auch dem Rückgang des Steinkohlebergbaus in Westdeutschland, gilt es daher die gelungenen Lösungsansätze zu übertragen und vergangene Fehler zu vermeiden. Eine proaktive Strukturpolitik unterstützt diesen Wandel und sollte parallel zum Ausstiegspfad mitkonzipiert werden.

#### 3.2.1 Direkte Arbeitsplätze in der Kohlewirtschaft

**38.** Die Zahl der betroffenen Arbeitsplätze in der Braunkohlewirtschaft war in den letzten Jahren Gegenstand verschiedener Studien. Die Ergebnisse variieren zwischen circa 25.000 (UBA 2015a) und circa 75.000 (r2b energy consulting und HWWI 2014) betroffenen Arbeitsplätzen. Diese Abweichungen sind auf unterschiedliche Bezugsgrößen und Annahmen zurückzuführen. Differenziert wird zwischen direkten, indirekten und induzierten Arbeitsplatzeffekten. Basierend auf offiziellen Statistiken können die gegenwärtig direkt in der Kohlewirtschaft Beschäftigten klar beziffert werden (s. Tab. 5). Genaue Daten über die Zahl der indirekten Arbeitsplätze in der Kohlewirtschaft, die beispielsweise bei der Wartung, in den kundenbezogenen Servicebereichen der Energieversorger oder bei vor- und nachgelagerten Produktionsketten bestehen, liegen dagegen nicht vor.

**39.** Im Jahr 2016 waren in der Braunkohleindustrie in Deutschland ungefähr 17.700 direkt Beschäftigte sowie 1.300 Auszubildende tätig (s. Tab. 5). Auf die Kraftwerke entfallen dabei mit 5.161 ungefähr ein Viertel der Beschäftigten. Die restlichen Beschäftigten sind in den Tagebauen und der Veredelung beschäftigt. Im bis 2018 auslaufenden deutschen Steinkohlebergbau gibt es der-

zeit 6.285 Arbeitsplätze (Statistik der Kohlenwirtschaft 2017). Über die in den Steinkohlekraftwerken Beschäftigten gibt es dagegen keine verlässlichen Daten. Die Gewerkschaft Verdi errechnet in einem Gutachten, das auf einer Mitgliederbefragung in 15 Kraftwerksblöcken basiert, einen Beschäftigungsschlüssel von 330 Beschäftigten pro Gigawatt Kapazität (enervis energy advisors 2016). Hieraus würde sich eine Zahl von rund 9.000 Beschäftigten ergeben. Diese liegt jedoch deutlich über dem Wert von 5.000 Beschäftigten, welcher von der Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE 2014) im Rahmen von möglichen Umstrukturierungen der Steinkohlebranche genannt wurde.

Im Herbst 2016 kündigten sowohl RWE als auch Steag einen weiteren betriebsbedingten Stellenabbau von jeweils 800 bis 1.000 Beschäftigten an (Der Westen 12.09.2016). Bei RWE ist dies unter anderem durch die anstehende Überführung von fünf älteren Kraftwerksblöcken in die Sicherheitsbereitschaft bedingt. Diese Kraftwerksblöcke werden nach vier Jahren im Reservebetrieb vollständig geschlossen. Steag schließt zahlreiche

Steinkohlekraftwerke aufgrund ihrer fehlenden Rentabilität. Auch die LEAG hat einen Abbau von 600 Arbeitsplätzen aufgrund der Einführung der Sicherheitsbereitschaft angekündigt (Lausitzer Rundschau 20.03.2017). Im Ergebnis ist davon auszugehen, dass sich die Anzahl der in der Braun- und Steinkohleindustrie direkt Beschäftigten in den nächsten Jahren aus betriebswirtschaftlichen Gründen von 30.000 auf ungefähr 20.000 reduzieren wird. Um eine vollständige Betrachtung der direkten Beschäftigungseffekte des anstehenden Kohleausstiegs durchzuführen, müssten auch die wachsenden Beschäftigtenzahlen im Bereich der erneuerbaren Energien hinzugezählt werden. Deren Anstieg in den letzten Jahren hat sowohl die bereits weggefallenen, als auch die verbleibenden Arbeitsplätze in der Kohlewirtschaft deutlich übertroffen (DEHNEN et al. 2015; LEHR et al. 2015). Allerdings sind diese über Gesamtdeutschland verteilt, sodass Regionen von der Energiewende unterschiedlich betroffen sind („Rückenwind im Norden: Studie zeigt Verteilung der Erneuerbaren-Jobs in den Bundesländern“, Pressemitteilung der Agentur für Erneuerbare Energien vom 26. Juni 2017).

#### o Tabelle 5

Verbleibende direkte Arbeitsplätze in der Braun- und Steinkohleindustrie in Deutschland in Tausend

Direkt Beschäftigte in den Braunkohlerevieren	
Rheinland	9,0
+ Lausitz	8,3
+ Mitteldeutschland	2,4
+ Helmstedt	0,2
= Aufsummierte direkt Beschäftigte in den Braunkohlerevieren	19,9
– Beschäftigte der LMBV (Wiedernutzbarmachung von DDR-Tagebauen)	0,6
– Beschäftigte in Helmstedt (Wiedernutzbarmachung & Reservevorhaltung)	0,2
≈ Verbleibende direkt Beschäftigte in der Braunkohleindustrie	19,0
– Auszubildende	1,3
<b>≈ Feste Beschäftigte in der Braunkohleindustrie (Kraftwerke &amp; Tagebaue)</b>	<b>17,7</b>
+ Beschäftigte im Steinkohlebergbau	6,3
+ Beschäftigte in Steinkohlekraftwerken	5,0–9,0
<b>≈ Feste direkt Beschäftigte in der Braun- und Steinkohleindustrie 2016</b>	<b>29,0–33,0</b>
– Auslaufen des Steinkohlebergbaus 2018	6,3
– Stellenabbau bei RWE (5 Braunkohleblöcke in Sicherheitsbereitschaft)	0,8–1,0
– Stellenabbau bei Steag (Steinkohlekraftwerksstilllegungen)	0,8–1,0
– Stellenabbau bei LEAG (2 Braunkohleblöcke in Sicherheitsbereitschaft)	0,6
– möglicher weiterer Stellenabbau bei anderen Unternehmen von 2016–2019	?
<b>≈ Verbleibende direkt Beschäftigte in der Braun- und Steinkohleindustrie im Jahr 2019</b>	<b>20,1–24,5 abzgl. ?</b>

Unstimmigkeiten bei den Summen resultieren aus Rundungsungenauigkeiten.

Quelle: Statistik der Kohlenwirtschaft 2017; enervis energy advisors 2016; IG BCE 2014; Der Westen 12.09.2016; 25.10.2015; Lausitzer Rundschau 20.03.2017; WÖRLEN et al. 2017

### 3.2.2 Indirekte und induzierte Arbeitsplatzeffekte

**40.** Studien, die indirekte Arbeitsplätze mit einbeziehen, verwenden meist einen Faktor von 1 bis 2 (bezogen auf die direkten Arbeitsplätze), um deren Zahl abzuschätzen. Das Öko-Institut (2017) verweist in einer Studie für die Agora Energiewende darauf, dass der zusätzliche Anteil der indirekten Arbeitsplätze ansteigt, je größer der Untersuchungsraum wird. Der Faktor wird für das Kohlerevier mit 1 angegeben. Dieser Faktor steigt bei Miteinbeziehen von weiteren Pendlerinnen und Pendlern und Zulieferbetrieben in der umliegenden Region auf ungefähr 1,5 und für Gesamtdeutschland auf bis zu 2. Die indirekten Beschäftigungseffekte sind bei Kraftwerken ungefähr doppelt so hoch wie beim Tagebau. Die genaue Anzahl dieser Beschäftigten ist ebenso unklar wie die Frage, ob diese Arbeitsplätze bei einem Kohleausstieg ersatzlos wegfallen würden. So können durch die bereits stattfindenden Veränderungen in den Regionen aufgrund von Anpassungsreaktionen neue Beschäftigungsmöglichkeiten entstehen. Dies kann sowohl die Neugründung von Firmen als auch die Umwandlung von bestehenden Geschäftsmodellen, beispielsweise zum Bau und zur Wartung von Windenergieanlagen oder für alternative Produktionsprozesse für Gips, betreffen. Die meisten ökonomischen Arbeitsmarktmodelle können solche dynamischen Veränderungen des Arbeitsmarktes nicht oder nur bedingt abbilden. Die aus diesen Modellrechnungen resultierenden Zahlen beziehen sich somit nur auf die wegfallenden direkten und indirekten Arbeitsplätze und lassen außer Acht, dass ein Teil dieser Arbeitsplätze durch Anpassungsreaktionen des Marktes aufgefangen wird. Bei Berücksichtigung dieser Anpassungseffekte sowie einer Ausweitung des Untersuchungsraumes – sowohl zeitlich als auch regional – sind die Netto-Beschäftigungseffekte des Kohleausstiegs somit sogar positiv (DEHNEN et al. 2015; LEHR et al. 2015).

Eine Studie von Prognos für Vattenfall und die MIBRAG bezieht neben direkten und indirekten Arbeitsplätzen auch induzierte Beschäftigungseffekte ein (HOBOHM et al. 2011). Als induzierte Beschäftigungseffekte werden Arbeitsplätze bezeichnet, die durch die Kaufkraft im Braunkohlesektor Beschäftigter entstehen. Die Studien nehmen an, dass diese Arbeitsplätze bei der Verminderung der Braunkohlearbeitsplätze vollständig wegfallen würden. Dies lässt allerdings außer Acht, dass die zuvor im Braunkohlesektor Beschäftigten eine neue Anstellung finden können. Und selbst bei einer zeitweiligen Arbeitssuche – finanziert durch den Bezug von Sozialtransfers – tragen sie temporär noch zu einem gewissen Anteil zum Erhalt der induzierten Arbeitsplätze bei. Das Miteinbeziehen von induzierten Arbeitsplätzen überschätzt daher, ähnlich wie

die Berechnung der indirekten Beschäftigten, die Arbeitsplatzauswirkungen des Kohleausstiegs, da ein alleiniger Fokus auf die wegfallenden Beschäftigten erfolgt, ohne dynamische Anpassungsreaktionen mit einzubeziehen.

Noch höhere Auswirkungen auf die Beschäftigungszahlen werden ermittelt, wenn Strompreiseffekte in die Rechnungen miteinbezogen werden (r2b energy consulting und HWWI 2014). Dahinter liegt die Annahme, dass durch den Kohleausstieg die Strompreise deutlich steigen könnten, was zu weiteren Arbeitsplatzverlusten in der energieintensiven Industrie führen könnte. Zahlreiche Modellrechnungen zeigen jedoch, dass ein strukturierter Kohleausstieg nur zu einem minimalen Börsenstrompreisanstieg führt (HERMANN et al. 2017; OEI et al. 2014; 2015a; 2015b; HORST et al. 2015). Dieser minimale Anstieg führt automatisch zu einer Reduktion der Umlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz, da sich diese aus der Differenz von Börsenstrompreis und vereinbarten Vergütungen errechnet. Dadurch wird ein möglicher Strompreiseffekt des Kohleausstiegs für die meisten privaten und – nicht von der EEG-Umlage befreiten – industriellen Endkunden zusätzlich abgedeckt. Selbst bei den meisten energieintensiven Betrieben sind die Strombeschaffungskosten nur für einen sehr geringen Anteil der Gesamtkosten verantwortlich (PESCIA und REDL 2014; NEUHOFF et al. 2014; GERMESHAUSEN und LÖSCHEL 2015). Darüber hinaus sind die Strompreise für die energieintensiven Betriebe, unter anderem auch aufgrund der Befreiung von der EEG-Umlage, in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken. Daher ist nicht davon auszugehen, dass ein leichter Anstieg der Strompreise zu Arbeitsplatzverlusten in der energieintensiven Industrie führen würde (SRU 2016, Kap. 2; ELMER et al. 2016). Da eine eindeutige Berechnung der indirekten oder induzierten Arbeitsplätze nicht möglich ist, liegt im Folgenden der Fokus auf den direkt betroffenen 20.000 bis 30.000 Arbeitsplätzen in der Kohleindustrie.

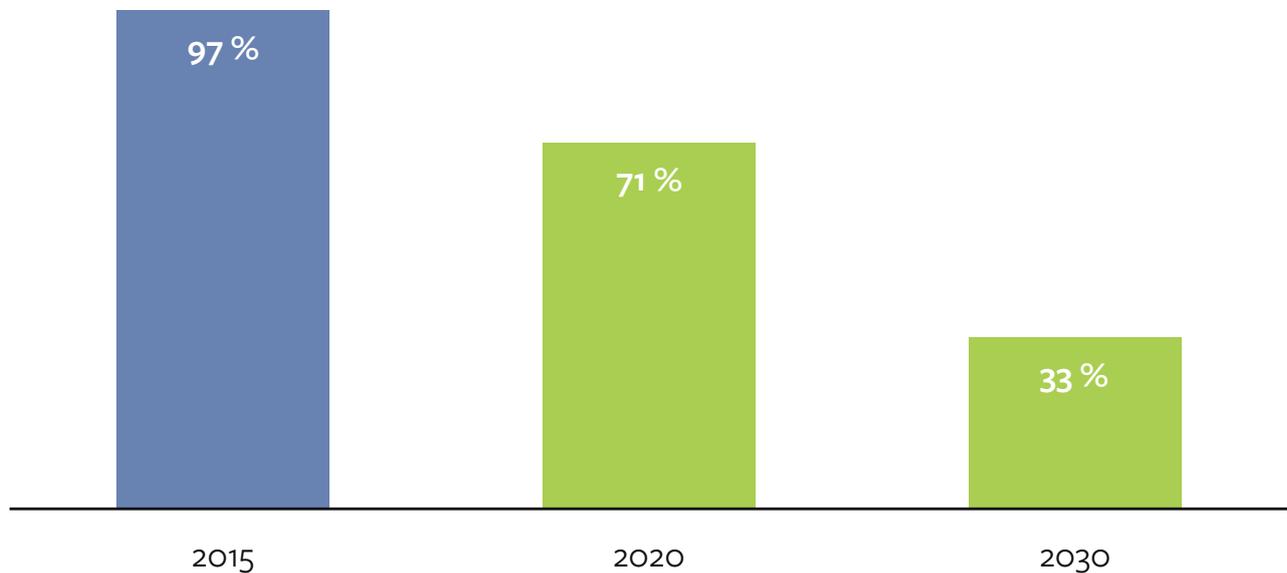
### 3.2.3 Altersstruktur der Beschäftigten in der Kohlewirtschaft

**41.** Die Altersstruktur der in der Braunkohlewirtschaft verbleibenden direkt Beschäftigten weist Besonderheiten auf, aus der sich Schwerpunkte für zukünftige arbeitsmarktpolitische Programme ableiten lassen (s. Abb. 4; Statistik der Kohlewirtschaft 2016):

- Zwei Drittel der Beschäftigten sind derzeit älter als 46 Jahre. Diese sind im Jahr 2030 älter als 60 Jahre. Bei einem Kohleausstieg innerhalb der nächsten zwanzig Jahre bedeutet dies, dass ein Großteil dieser Arbeiten-

#### ◦ Abbildung 4

Anteil der im Jahr 2015 in der Braunkohlewirtschaft Beschäftigten, die zum jeweiligen Zeitpunkt jünger als 60 Jahre sind



SRU 2017; Datenquelle: Statistik der Kohlewirtschaft 2016

den bis zur Rente in den Betrieben verbleiben kann. Da das Alter der Kraftwerksblöcke nicht mit dem Alter der dort Beschäftigten korreliert, kann ein Austausch von Arbeitskräften innerhalb der Reviere wegfallende Expertisen ausgleichen und zugleich sozial abfedernd wirken.

- In den letzten Jahren gab es für Beschäftigte ab einem Alter von 55 Jahren verschiedene Frühverrentungsprogramme, die unter Umständen für weitere 10 % der Beschäftigten nach dem Auslaufen der Kohleverstromung infrage kommen könnten.
- Für das verbleibende Viertel der Beschäftigten müssen neue Arbeitsplätze durch eine gezielte Regionalentwicklung geschaffen werden. Hierfür fallen unter Umständen Umschulungskosten für circa 5.000 bis 7.500 Personen in Deutschland an.
- Mit dem Auslaufen der Braunkohleverstromung fallen jährlich 300 bis 400 Stellen für Auszubildende in den Regionen weg, die ersetzt werden müssen.

**42.** In der Steinkohleindustrie finden sich viele Parallelen zur Situation der Braunkohle. Allerdings sind die Beschäftigten im Steinkohlebergbau im Durchschnitt älter als in der Braunkohlebranche (Statistik der Kohlewirtschaft 2016). Darüber hinaus fallen in der Steinkohlewirtschaft deutlich weniger Arbeitsplätze weg, die sich

bei den Kraftwerken zudem auf mehr Regionen verteilen. Der Schwerpunkt der Strukturförderung sollte daher in den Braunkohlerevieren liegen.

### 3.2.4 Abfederung von Strukturentwicklungen

**43.** Es hat bereits eine Vielzahl von wirtschaftlichen Umstrukturierungen in Deutschland stattgefunden. So gingen zwischen 1970 und 1984 in Deutschland 500.000 Arbeitsplätze in der Textilindustrie (FRÖBEL et al. 1986, S. 58) und im Zeitraum von 1975 bis 1984 fast 300.000 Arbeitsplätze in der Stahlindustrie verloren (SCHUCHT 1998; BINDER und SCHUCHT 2001). Auch in der Energiewirtschaft hat es in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Wandlungsprozesse gegeben. So sind die Beschäftigtenzahlen im Steinkohlebergbau von über 600.000 im Jahr 1957 auf 250.000 im Jahr 1970 zurückgegangen (Statistik der Kohlewirtschaft 2016). Im Jahr 2007 wurde für den Steinkohlebergbau eine Einigung zwischen Politik und den Tarifpartnern getroffen, die zu dem Zeitpunkt verbliebenen 35.000 direkten Arbeitsplätze und damit die gesamte heimische Steinkohleförderung bis 2018 abzubauen (Gesetz zur Finanzierung der Beendigung des subventionierten Steinkohlebergbaus zum Jahr 2018). Die Zahl der mehr als 100.000 in der Braunkohle Beschäftigten in der DDR ging nach 1990 innerhalb eines Jahrzehnts auf 10.000 zurück (Statistik

der Kohlenwirtschaft 2016). Auch in der Solarindustrie gingen in kürzester Zeit (zwischen 2012 und 2013) über 45.000 Arbeitsplätze verloren (BMW 2014, S. 93). Teilweise waren auch die Auswirkungen dieser Arbeitsplatzverluste regional konzentriert.

Um diesen Strukturwandel sozialpolitisch zu flankieren, hat sich in der Vergangenheit vor allem eine Kombination folgender Instrumente bewährt, um sowohl die aktive Strukturentwicklung zu fördern als auch mögliche negative lokale Auswirkungen abzufedern:

- Regionale Wirtschaftsförderung (z. B. im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur) und ergänzende Länderprogramme,
- Sozialpläne, insbesondere um die Einkommensverluste bei vorzeitigen Entlassungen zu kompensieren,
- Vermeidung betriebsbedingter Kündigungen, Ersatzarbeitsplatz- und Einkommensgarantie,
- Frühverrentung mit weitgehender Lohnkompensation,
- aktive Arbeitsmarktpolitik, zum Teil sogar mit Beschäftigungsangeboten im öffentlichen Dienst,
- Umschulungs- und Qualifizierungsmaßnahmen.

**44.** Vergleicht man die genannten großen Strukturentwicklungen zurückliegender Jahrzehnte mit den in den nächsten zwanzig Jahren gefährdeten etwa 20.000 bis 30.000 direkten Arbeitsplätzen in der Kohleindustrie, so erscheint dieser Rückgang eher gering und industrie- und sozialpolitisch gestaltbar. Allerdings unterscheidet sich der anstehende Braunkohleausstieg von den genannten Strukturwandelprozessen dadurch, dass letztere hauptsächlich durch den (internationalen) Wettbewerb getrieben waren. Der Braunkohleausstieg ist wirtschaftlich durch den Erfolg der erneuerbaren Energien bedingt; die beschleunigte Geschwindigkeit des Ausstiegs wäre aber eine Konsequenz politischer Entscheidungen (SCHULZ und SCHWARTZKOPFF 2016). Daraus resultiert eine zusätzliche Verantwortung des Staates bei der sozialverträglichen Gestaltung des Wandelprozesses.

Die Entwicklung des Arbeitsmarktes in der Energiewirtschaft erfolgt nicht einheitlich: Während in der Kohleindustrie Arbeitsplätze wegfallen, hat die Zahl der Beschäftigten insgesamt in den letzten zehn Jahren zugenommen. Dies ist vor allem auf den Ausbau der erneuerbaren Energien infolge der Energiewende zurückzuführen (BMW 2014). Allerdings sollten bei einem Vergleich von Arbeitplatzeffekten neben der Anzahl der Arbeitsplätze weitere

Aspekte wie die Höhe des Gehaltes und die Zukunftsperspektiven der Beschäftigungsverhältnisse mit einbezogen werden. Ehemals in der Braunkohleindustrie Beschäftigte haben bei einem Wechsel in andere Industriezweige zwar deutlich bessere Zukunftsperspektiven, müssen aber im Durchschnitt mit erheblichen Gehaltseinbußen rechnen: Eine Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) beziffert in einer Analyse der ostdeutschen Beschäftigtendaten von 1998 bis 2010 die Einkommenseinbußen von Branchenwechslern im Durchschnitt auf 20 bis 30 % (FRANKE et al. 2017). Ältere Beschäftigte erleiden die größten Einkommensverluste. Eine hierdurch bedingte Abwanderung nach Süd- und Westdeutschland ist dagegen kaum festzustellen.

Ein Grund für die Gehaltseinbußen bei einem Branchenwechsel ist das hohe Ausgangsniveau in der Braunkohleindustrie. So wurde in einer Studie für Verdi das durchschnittliche Arbeitnehmerentgelt (Bruttogehalt inkl. einem Sozialversicherungsanteil von 21 % durch den Arbeitgeber) mit rund 68.000 Euro angegeben (enervis energy advisors 2016). Insbesondere die Aktivitäten der Gewerkschaften IG BCE und Verdi haben in den letzten Jahrzehnten für gut bezahlte Arbeitsverhältnisse in der Kohlewirtschaft gesorgt. Neben diesen sehr gut organisierten Industriezweigen haben sich im Bereich der neueren Geschäftsfelder, wie beispielsweise den erneuerbaren Energien, bisher nur deutlich schwächere gewerkschaftliche Vertretungen herausgebildet.

### 3.2.5 Neue Perspektiven für die Kohleregionen

**45.** Der Ausstieg aus der Kohleverstromung hat auf die verschiedenen Braunkohlereviere ganz unterschiedliche Auswirkungen. Viele Studien haben sich bereits mit dem bevorstehenden Strukturwandel in Ostdeutschland und insbesondere der Lausitz auseinandergesetzt, da es in der Region bisher wenig andere Industrie gibt (MARKWARDT et al. 2016; SCHWARTZKOPFF und SCHULZ 2015; KUTZNER 2014; KLUGE et al. 2014; VALLENTIN et al. 2016; BOSHOLD 1999; HAUSER und LEPRICH 2008; BLANKE et al. 2010). Im Rheinischen Revier gibt es dagegen deutlich mehr andere Industriezweige, eine unmittelbare Nähe zu urbanen Zentren wie Köln, Düsseldorf und Aachen sowie ein höheres Innovationspotenzial (Regionomica 2013; IRR 2016; OPIELKA et al. 2014; SCHEUERMANN et al. 2012). Allerdings sind im Rheinischen Revier viele Kommunen durch ihre Beteiligungen an RWE direkt von den Einnahmen der Kohleverstromung abhängig. Einige Kommunen sind zudem auch direkt von geringeren Gewerbesteuererträgen und zusätzlichen Sozialtransfers für Arbeitssuchende betroffen.

Neben den wirtschaftlichen Folgen für Beschäftigte und Unternehmen sind daher auch Interessen von Kommunen und Bundesländern betroffen, die Berücksichtigung finden müssen.

**46.** In den ostdeutschen Braunkohlerevieren erschwert ein drohender verstärkter Fachkräftemangel den Aufbau von neuen Industriezweigen zusätzlich. Dafür sind hauptsächlich demografische Effekte verantwortlich (MARKWARDT et al. 2016). So wird beispielsweise in der Lausitz ein Rückgang der Erwerbstätigen um 36 % von 2015 bis 2030 erwartet (IMU 2015), was deutlich über dem westdeutschen Niveau von 8 % liegt. Verbunden mit der Abwanderungen nach Süd- und Westdeutschland in der Vergangenheit resultieren daraus laut Zukunftsatlas 2013 von Prognos (Prognos AG 2013) für einen Großteil der betroffenen Landkreise in Ostdeutschland „leichte bis hohe Zukunftsrisiken“ sowie eine „schwache Wirtschaftsdynamik“.

Mögliche bereits bestehende alternative Zukunftsfelder bieten unter anderem die Chemie- und Automobilbranche in Mitteldeutschland sowie verschiedene Wirtschaftszweige in Nordrhein-Westfalen (u. a. Chemie, Automobil, Logistik, Energie). Für die bisher weniger divers industrialisierte Lausitz ist der Wegfall der Braunkohleindustrie jedoch schwieriger abzufedern. In den letzten Jahren wurde daher insbesondere die Tourismusbranche gefördert. In der Zukunft sollten gezielt weitere neue und nachhaltige Perspektiven in verschiedenen Wirtschaftszweigen aufgebaut werden.

**47.** Die vielfältigen Möglichkeiten für einen sozialverträglichen Strukturwandel sollten in die Entwicklung eines flankierenden Bund-Länderprogramms „Kohleausstieg“ einfließen. Ein solches Programm sollte finanziell hinreichend ausgestattet sein und verschiedene, für eine sozialverträgliche Flankierung einsetzbare Förderprogramme bündeln und koordinieren. Der Thinktank Agora Energiewende (2016a) schlägt hierfür einen „Strukturwandelfonds Braunkohleregionen“ vor, welcher jährlich mit 250 Mio. Euro ausgestattet werden soll. Dieser Betrag entspräche knapp einem Viertel der laufenden jährlichen Steinkohlesubventionen (Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste 2017). Diese fallen insbesondere für Absatzhilfen und zu kleineren Anteilen für Anpassungsgelder und Bergmannsprämien an. Mit dem Auslaufen des Steinkohlebergbaus und dessen Subventionen in 2018 könnte ein Teil dieser Gelder gezielt für die Strukturentwicklung in den Braunkohlerevieren verwendet werden. Zentral ist, dass es gemeinsam mit allen betroffenen Akteuren entwickelt und im Konsens beschlossen wird (SRU 2015a). Ziel eines solchen Programmes sollte es sein, die derzeitigen Braunkohlereviere – basierend auf ihren individuellen Stärken – nachhaltig weiter-

zuentwickeln und somit eine mögliche Deindustrialisierung zu verhindern. Dies gilt insbesondere für die weitere Entwicklung in der Lausitz (Agora Energiewende 2017). Neben einer Absicherung von ausreichenden Arbeitsplätzen ist hierbei eine Vielzahl von verschiedenen harten und weichen Faktoren zu berücksichtigen. Durch ein erfolgreiches Zusammenspiel dieser Faktoren kann es gelingen, eine hohe Lebensqualität für die Menschen in den betroffenen Regionen zu prägen. Damit einher kann eine verstärkte positive Identifikation mit der Region gehen, die nachhaltig zur Weiterentwicklung beiträgt.

**48.** In den Braunkohlerevieren müssen basierend auf den lokalen Voraussetzungen und Potenzialen geeignete Felder identifiziert und gefördert werden. Neben den traditionellen Wirtschaftsbereichen sollten hierbei auch neue Zukunftsfelder gezielt aufgebaut werden, da es in diesen für die Braunkohleregionen leichter sein könnte eine Vorreiterrolle zu erlangen. Beispielhaft haben die Innovationsregion Lausitz GmbH und die IHK Cottbus für die Lausitz die Wachstumsmärkte und Handlungsfelder

- erneuerbare Energien,
- urbane Energiewende/Fernwärmeversorgung,
- Robots XXL im Bereich der Automatisierungstechnik,
- Elektromobilität und
- Ausbau der Infrastruktur im Städtedreieck Berlin–Dresden–Leipzig

identifiziert (LANGE und KRÜGER 2017).

Bei der Identifizierung und Förderung von möglichen Förderschwerpunkten in den Kohleregionen muss hierbei immer einbezogen werden, inwiefern diese mit den langfristigen (Klimaschutz-)Zielen Deutschlands vereinbar sind. So sollten gezielt nachhaltige Zukunftsmärkte, wie beispielsweise erneuerbare Energien oder Elektromobilität, gefördert werden. Investitionsförderungen für bestehende Standorte („brownfield“) sind hierbei besser als die Förderung von komplett neuen Standorten („greenfield“), weil dann auf bestehende Infrastrukturen zurückgegriffen werden kann, sodass keine zusätzliche Flächenneuanspruchnahme notwendig wird. Auch beim Aufbau von zusätzlicher Transportinfrastruktur sollte die erforderliche Mobilitätswende mitbedacht werden, die eine stärkere Verlagerung von der Straße auf die Schiene notwendig macht (Agora Verkehrswende 2017).

**49.** Für eine bessere Strukturentwicklung sollte versucht werden, die Ansiedlung von neuen Unternehmen und deren Beschäftigten unmittelbar in den Kohleregionen

zu unterstützen. Um zu große Pendlerbewegungen in weiter entfernte Großstädte (z. B. Berlin, Dresden, Düsseldorf oder Köln) zu vermeiden, sollte hierbei gezielt die bestehende Infrastruktur innerhalb der Kohlereviere miteinbezogen werden. So kann es durch das gezielte Schaffen neuer Arbeitsplätze an Hochschulstandorten gelingen, junge Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer in der Region zu halten. Zudem hilft der Aufbau von lokalen Forschungseinrichtungen und Gründerinitiativen Know-how und Lösungsansätze vor Ort (weiter) zu entwickeln. Dies erhöht die Akzeptanz von Vorschlägen und trägt zudem zum Aufbau von lokaler Expertise und regionaler Identifikation bei. Eine erfolgreiche positive (Re-)Identifikation mit den Braunkohlereviere kann aber nur erfolgen, wenn neben der Bereitstellung von gut bezahlten Arbeitsplätzen auch weitere – größtenteils weiche – Faktoren zu einem positiven Lebensklima und einer hohen Lebensqualität beitragen. Ein Vorteil ist, dass die Reduktion der Kohleverstromung gesundheitliche Faktoren unmittelbar positiv beeinflusst (s. Kap. 2.2). Zudem gibt es die Möglichkeit, im Rahmen von Wiedernutzbarmachungen der Tagebauflächen Freizeit- und Kultureinrichtungen für die Anwohnerinnen und Anwohner und zum Aufbau des Tourismus zu schaffen.

**50.** Festzuhalten ist, dass die sozialen Veränderungen durch den anstehenden Kohleausstieg im Vergleich zu früheren historischen Struktureffekten in Deutschland überschaubar und somit auch lösbar sind. Für einzelne betroffene Landkreise, insbesondere in der Lausitz, stellen sie dennoch eine ernst zu nehmende Herausforderung dar. Dadurch direkt betroffene Betriebe wünschen sich daher von der Bundesregierung Planungssicherheit durch einen festen konkreten Ausstiegsfahrplan (MARKWARDT et al. 2016). Eine aktive Strukturpolitik gezielt für diese Regionen sollte daher von Beginn an parallel zu energiewirtschaftlichen Ausstiegsszenarien mitgedacht werden. Der anstehende Wandel sollte zudem als Chance wahrgenommen werden, um die Reviere nachhaltig weiterzuentwickeln. Der Fokus sollte von rein monetären Aspekten, wie den Gehältern der in der Kohleindustrie verbleibenden Arbeitenden, um weitere wichtige Faktoren, wie Umwelt, Gesundheit, Soziales und Ausbildung, erweitert werden. Wird ein Umfeld geschaffen, das diese Aspekte positiv beeinflusst, kann es gelingen, eine (Re-)Identifikation mit und in den Braunkohlereviere zu schaffen. Für die Zukunft der Energiewende ist es besonders wichtig, dass Deutschland demonstriert, wie solch eine planvolle Strukturentwicklung gelingen kann, damit andere Sektoren und andere Länder dem Beispiel folgen können.

## 3.3 Sicherstellen der Versorgungssicherheit

**51.** Bei der Gestaltung des zukünftigen Strommarktes unter Einhaltung der (inter-)nationalen Klimaschutzziele müssen ausreichende Anpassungen erfolgen, um die Versorgungssicherheit in Deutschland sicherzustellen. Dabei muss die inländische Stromnachfrage zu jedem Zeitpunkt durch eine Kombination von regelbaren Erzeugungskapazitäten, dem zu diesem Zeitpunkt verfügbaren dargebotsabhängigen Anteil erneuerbarer Energien und dem Import aus den Nachbarländern gewährleistet sein. Durch den deutschen Atomausstieg werden bis spätestens 31. Dezember 2022 die letzten Atomkraftwerke abgeschaltet. Ein Ausstieg aus der Kohleverstromung wird sich dagegen über einen längeren Zeitraum bis in die 2030er-Jahre erstrecken. Innerhalb der nächsten zwanzig Jahre muss daher parallel zum Auslaufen der Kohleverstromung verstärkt in den Aufbau CO<sub>2</sub>-freier Erzeugungskapazitäten investiert werden. Durch einen größeren werdenden Anteil erneuerbarer Energien sinkt zudem die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen und somit auch die Importquote für den Primärenergieeinsatz (Agora Energiewende 2017).

In einem zunehmend von erneuerbaren Energien dominierten Energiesystem werden die verbleibenden konventionellen Anlagen immer weniger benötigt. Dennoch hoffen die meisten Kraftwerksbetreiber, dass Blöcke anderer Betreiber zuerst geschlossen werden, um durch Knappheitspreise die Wirtschaftlichkeit der eigenen Anlagen zu verbessern. In Europa bestehen daher derzeit große Überkapazitäten im Bereich der Grundlaststromerzeugung, die auch zu den niedrigen Großhandelspreisen für Strom beitragen. Laut dem Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E 2016) betragen sie im Jahr 2016 circa 40 GW in dem für Deutschland relevanten Strommarktgebiet. Dieses Gebiet umfasst Deutschland, alle direkt mit Stromleitungen verbundenen Nachbarländer sowie Italien. Im europäischen Vergleich mit anderen fossilen Erzeugungsanlagen profitieren insbesondere die deutschen Braunkohlekraftwerke von niedrigeren Brennstoffkosten. Sie können somit Strom in die Nachbarländer exportieren, wenn ein Großteil des inländischen Marktes durch erneuerbare Energien gedeckt wird. Die nahezu gleichbleibende Auslastung der Kohlekraftwerke hat in Verbindung mit der ansteigenden Stromproduktion durch erneuerbare Energien nicht nur zu einem niedrigen Strompreisniveau, sondern auch zu einem deutschen Rekordstromexport im Jahr 2016 von 54 TWh geführt (AGEB 2017). Dies entspricht fast 10 % der jährlichen Stromproduktion.

Die maximale inländische Stromnachfrage beträgt derzeit 86 GW. Durch die erwartete Sektorkopplung kann sich diese Stromnachfrage durch zusätzlichen Bedarf der Sektoren Verkehr und Wärme erhöhen (KUNZ und MAIER 2017). Allerdings geht dies einher mit neuen Potenzialen der Strombedarfsglättung zum Ausgleich der fluktuierenden erneuerbaren Energien. Insgesamt sind in Deutschland etwa 190 GW an konventioneller und erneuerbarer Nettoeinspeiseleistung installiert, die jedoch nicht alle dauerhaft zur Verfügung stehen. Die konventionellen Energieträger haben eine sehr hohe Verfügbarkeit und setzen sich aus 76 GW mit fossilen Energieträgern (Gas, Öl, Braun- und Steinkohle) und 11 GW aus Atomkraftwerken zusammen. Dazu kommen weitere zum Teil regelbare Energiequellen von insgesamt 22 GW (Pumpspeicher, Wasser, Biomasse und Abfall) sowie 83 GW an dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien (Wind und Photovoltaik) (Bundesnetzagentur 2015). Berechnungen des Instituts für Zukunftssysteme (IZES) (HORST et al. 2015) zeigen, dass auch bei einem Kohleausstieg bis zum Jahr 2040 durch Gas- und Dampf-Kombikraftwerke (GuD-Kraftwerke) ausreichend steuerbare Erzeugungseinheiten am Netz verbleiben, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dies wird unterstützt durch einen starken Ausbau und eine Erhöhung der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien, ermöglicht durch eine Kombination von

- technischen Neuerungen bei den Anlagen (u. a. durch Schwachwindanlagen, nachgeführte Photovoltaikanlagen),
- verbesserten Speicheroptionen (u. a. durch Reduktion der Batteriepreise, Power-to-X als Mittel- und Langfristoption) und
- zusätzlichem Nachfragemanagement (u. a. durch Digitalisierung, Effizienzverbesserung, Nachfragereduktion).

**52.** Neben der Frage der ausreichenden Leistung muss auch sichergestellt sein, dass alle notwendigen Systemdienstleistungen zur Sicherung der Netzstabilität gewährleistet sind. Trotz des starken Zuwachses bei den erneuerbaren Energien ist das deutsche Stromnetz in den letzten Jahren noch zuverlässiger geworden. So hat sich der Stromausfallindex SAIDI (System Average Interruption Duration Index) in den letzten zehn Jahren auf einen Tiefstwert von zwölf Minuten pro Jahr halbiert (Bundesnetzagentur 2016). Dieser Wert liegt deutlich unter dem der USA (Faktor 18) oder anderer europäischer Länder. Insbesondere für die Betriebsführung und die Frequenz- und Spannungshaltung spielt die Kohleverstromung allerdings derzeit noch eine entscheidende Rolle. Sie muss daher durch alternative Technologien ersetzt werden. Da sich derzeit keine technologische

Lösung abzeichnet, die all diese Funktionen 1:1 ersetzen kann, müssen verschiedene Lösungen gezielt miteinander kombiniert werden. Die nachfolgende Tabelle 6 zeigt zusammengefasst die von der Deutschen Energie Agentur (dena 2014) dargestellten alternativen Möglichkeiten der Systemdienstleistung bei einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien. Dies zeigt, dass es bereits jetzt eine Vielzahl von alternativen technischen Möglichkeiten zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen gibt. Es muss allerdings noch weiter untersucht werden, wie der Umfang und die Art der Systemdienstleistungsprodukte durch den Kohleausstieg angepasst werden müssen. Hieraus ergibt sich gegebenenfalls ein Bedarf an weiteren neuen technischen Lösungen oder Anpassungen, um die für ein sicheres und stabiles Stromversorgungssystem erforderlichen Systemdienstleistungen wirtschaftlich und zuverlässig zu erbringen. So sollten unter anderem die Marktzugangskriterien, wie beispielsweise die Höhe der Mindestgebote, gesenkt werden, sowie auch der Betrachtungsraum für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen über die nationalen Grenzen hinweg erweitert werden, um eine bessere Nutzung dieser Potenziale zu gewährleisten (CE Delft und Microeconomics 2016; LORENZ 2017; LORENZ und GERBAULET 2017).

**53.** Ein frühzeitig geplanter, schrittweiser Kohleausstieg schafft wirtschaftliche Anreize für die Marktteilnehmer, Alternativen bereitzustellen. Dies könnten neben emissionsärmeren Erzeugungskapazitäten auch Fortschritte in den Bereichen Nachfragemanagement und Stromspeicher sein. Die Digitalisierung ermöglicht es, dieses komplexe „Prosumage“-Konzept von Produktion, Nachfrage und Speicherung (production, consumption and storage) zu synchronisieren. Erleichtert wird dies durch den erwarteten leichten Anstieg der Börsenstrompreise infolge der Abschaltung von Kohlekraftwerken. Allerdings erfolgt dieser nicht sprunghaft, fällt moderat aus und kompensiert im Wesentlichen den Verfall der Großhandelsstrompreise der vergangenen Jahre. Darüber hinaus wird der Effekt durch die bei steigenden Börsenstrompreisen sinkende EEG-Umlage für die Haushaltskunden und nicht EEG-befreiten Industrieabnehmer abgefedert (OEI et al. 2015a; HERMANN et al. 2017). Auch eine substanzielle Schwächung der deutschen Industrie und des Wirtschaftsstandorts Deutschland ist daher nicht zu erwarten (SRU 2016, Kap. 2; ELMER et al. 2016).

**54.** Insgesamt sind aktuell in Deutschland und Europa ausreichend Stromerzeugungskapazitäten vorhanden, um eine signifikante Anzahl an Kohlekraftwerken kurzfristig stillzulegen. Aber auch innerhalb der nächsten zwanzig Jahre kann eine schrittweise Abschaltung aller Kohlekraftwerke so gestaltet werden, dass die Versor-

o **Tabelle 6**

Bereitstellung von Systemdienstleistungen in einem auf erneuerbaren Energien basierten System

	<b>Frequenzhaltung Momentanreserve</b>	<b>Frequenzhaltung Regelleistungsbereitstellung</b>	<b>Spannungshaltung Blindleistungsbereitstellung</b>	<b>Spannungshaltung Kurzschlussleistungsbereitstellung</b>	<b>Versorgungswiederaufbau</b>	<b>Betriebsführung</b>
<b>Anforderungen 2030</b>	Reduktion des Beitrages konventioneller Kraftwerke  Unterstützung durch das europäische Verbundnetz	Bedarf an Sekundärregelleistung und Minutenreserve nimmt vermutlich zu	Blindleistungsbedarf steigt im Übertragungs- und Verteilnetz  Gestiegener Bedarf einer Blindleistungsregelung im Verteilnetz	Verfügbare Kurzschlussleistung ändert sich kaum  Starke zeitabhängige Schwankung in allen Netzebenen wegen dezentraler Energieanlagen	Genügend schwarzstartfähige Kraftwerke sind vorhanden	Gestiegene Notwendigkeit für Engpass- und Einspeisemanagement führt zu Abstimmungsbedarf zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber
<b>Alternative Erbringer</b>	Windenergieanlagen  Größere Freiflächen-Solar-kraftwerke  Batteriespeicher	Für alle Regelleistungsarten existieren alternative Erbringer, die den zukünftigen Bedarf decken können	Kompensationsanlagen  Umrichterstationen  Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung  Phasenschieber  Kraftwerke im Phasenschieberbetrieb  Bereitstellung aus dezentralen Energieanlagen im Verteilnetz	Umrüstung der Umrichter von Erneuerbare-Energien-Anlagen um Bereitstellung von Kurzschlussleistung auch ohne Wirkleistungseinspeisung zu ermöglichen	Dezentraler Versorgungswiederaufbau ist technisch möglich	Konventionelle Leittechnik für die Systemdienstleistung  Standardisierte Informations- und Kommunikationstechnologien notwendig
<b>Handlungsempfehlungen</b>	Nutzung der Trägheit von Windenergieanlagen  Langfristig: Überprüfung der Nutzung der Potenziale aus Drosselung dezentraler Energieanlagen und Speicher	Anpassung von Produkteigenschaften und Präqualifikationsanforderungen  Umsetzung adaptiver Bedarfsermittlung für Regelleistung	Koordinierte Blindleistungsbereitstellung aus dezentralen Energieanlagen im Verteilnetz erschließen  Blindleistung aus dem Hochspannungsnetz für das Höchstspannungsnetz als Alternative im Einzelfall zu prüfen	Möglichkeit des Verteilnetzbetreibers Kaltstartleistung ohne Wirkleistung von dezentralen Energieanlagen zu fordern  Auswirkung auf Schutzkonzepte muss im Einzelfall untersucht werden	Wetterlage und andere erzeugungsrelevante Prognosen müssen einbezogen werden  Gezielte Steuerung von Erneuerbare-Energien-Anlagen muss möglich sein	Ermöglichen der Abwägung zwischen Netzausbau und optimierter Betriebsführung insb. für Verteilnetzbetreiber  Zügige Umsetzung des Energieinformationsnetzes

Quelle: dena 2014, Anhang Tab. 3, verändert

gangssicherheit nicht beeinträchtigt wird. Zur Sicherstellung der verschiedenen Systemdienstleistungen ist bereits jetzt eine Vielzahl von alternativen technologischen Anwendungen verfügbar (Tab. 6). Erleichtert würde dies, wenn ein Teil der Emissionsminderungen durch den Teillastbetrieb von Kohlekraftwerken erreicht würde. In diesem Fall würde noch eine größere Anzahl an Kohlekraftwerkskapazitäten bei geringerer Auslastung

im System gehalten. Durch eine stärkere europäische Interaktion mit den Nachbarländern kann zudem der Bedarf an Systemdienstleistungen angepasst und deutlich reduziert werden. Dies erhöht die Ausnutzung der Potenziale der erneuerbaren Energien und stärkt somit die nationalen und europäischen Energie- und Klimaschutzziele.

## 4 Gestaltung des Kohleausstiegs

**55.** In der kommenden Legislaturperiode sollte ein Ausstieg aus der Kohleverstromung schnellstmöglich entschieden und ordnungsrechtlich ausgestaltet werden. Nach Auffassung des SRU sollte hierfür ein gesellschaftlich breit getragener und im Dialog mit Vertreterinnen und Vertretern der Regionen, Unternehmen und Gewerkschaften vereinbarter Konsens verabschiedet und danach ordnungsrechtlich umgesetzt werden (vgl. auch SRU 2015a).

### 4.1 Schritte zur Reduktion der Kohleverstromung

**56.** Eine Reduktion der Kohleverstromung kann sowohl durch europäische als auch nationale Klima- oder Umweltschutzinstrumente umgesetzt werden. Durch eine Kombination von verschiedenen Instrumenten ist es hierbei möglich, noch treffsicherer einen strukturierten Kohleausstiegspfad für Deutschland umzusetzen.

#### 4.1.1 Einbettung in die europäische Klimapolitik

**57.** Der europäische Emissionshandel (EU-ETS) ist zwar das zentrale Klimaschutzinstrument der EU, hat jedoch deutliche Schwächen (SRU 2015a). Daher begrüßt der SRU, dass die Bundesregierung zusätzliche nationale Maßnahmen im Rahmen des Klimaschutzplans 2050 ergreifen möchte.

Die Reform des EU-ETS mit Einführung einer Marktstabilitätsreserve und einer Anpassung des jährlichen CO<sub>2</sub>-Reduktionsfaktors lassen zumindest einen langsamen Abbau der bestehenden Zertifikatsüberschüsse – im Laufe der 2020er-Jahre – erwarten (MATTHES 2017; COWART et al. 2017). Durch die Reform werden ab 2019 überschüssige Zertifikate schrittweise in die Marktstabilitätsreserve überführt. Emissionsminderungen durch zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen auf nationaler Ebene werden somit nicht (bzw. nur in sehr geringem Ausmaß) durch einen unmittelbar höheren CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Ausland kompensiert, sondern erhöhen zunächst den Zertifikatsbestand in der Marktstabilitätsreserve. Die kurz- und mittelfristige klimapolitische Wirksamkeit ehrgeiziger nationaler Schritte wird damit gestärkt.

Ein hoher Bestand an Zertifikaten in der Marktstabilitätsreserve schafft überdies Spielräume, um in Zukunft das Ambitionsniveau der europäischen Klimapolitik zu erhöhen, wodurch die zusätzlichen nationalen Klimaschutzanstrengungen auch langfristig wirksam bleiben (SRU 2015a; ELMER et al. 2015). Ein geeigneter Schritt, um das Ambitionsniveau situationsbedingt zu erhöhen, wäre die Einführung einer absoluten Obergrenze des Zertifikatsbestands in der Reserve. Zertifikate oberhalb dieser Grenze sollten dann endgültig gelöscht werden (IWR 2017). Es werden auch weitere regelbasierte Mechanismen zur Löschung exzessiver, in der Marktstabilitätsreserve eingelagerter Überschüsse diskutiert (MATTHES 2017; COWART et al. 2017). Gemeinsames Ziel solcher Vorschläge ist es, eine langjährige Mitführung (und späte Rückführung) aufgelaufener Überschüsse zu verhindern und stattdessen eine Zertifikatsknappheit und ein wirksames Emissionspreissignal sicherzustellen.

Neben Ansätzen zur Stilllegung von in der Marktstabilitätsreserve eingelagerten Zertifikaten bestehen noch weitere Möglichkeiten, mit denen sich die klimapolitische Effektivität nationaler Maßnahmen absichern ließe. So könnten Mitgliedstaaten den Rückgang der heimischen Zertifikatsnachfrage direkt kompensieren, beispielsweise indem sie ihre Auktionsmenge kürzen. Zudem könnte die Emissionsobergrenze des EU-ETS (das Cap) regelmäßig nach Maßgabe der zusätzlichen nationalen Klimaschutzbemühungen angepasst werden (UBA 2017f).

#### 4.1.2 Nationale CO<sub>2</sub>-Reduktionsansätze

**58.** Um die Kohleverstromung in Deutschland gezielt zu reduzieren, stehen grundsätzlich drei Wege zur Verfügung:

- Die Abschaltung der ältesten, vor 1990 gebauten Braunkohlekraftwerke, da diese die höchsten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen haben (s. Tz. 29). Dies betrifft ungefähr 50 % der derzeit noch aktiven Braunkohlekraftwerke.
- Die Abschaltung der ältesten Braun- und Steinkohlekraftwerke: Bei einer Aufteilung der einzusparenden Emissionen auf Braun- und Steinkohlekraftwerke kann der Braunkohleausstieg langsamer erfolgen. Hierdurch können die über einen längeren Zeitraum auftretenden

o **Tabelle 7**

Mögliche Klimaschutzinstrumente und ihre finanzielle Auswirkung

Handlungsoptionen zur Reduktion der Kohleverstromung Staatshaushalt		Finanzielle Auswirkung (Effekt: + positiv; o neutral; – negativ)	
		Staatshaushalt	Kohleunternehmen
Instrumente zur Abschaltung der ältesten Kraftwerke	Sicherheitsbereitschaft/ „Kohlereserve“	–	+
	CO <sub>2</sub> -Grenzwerte (spezifisch)	o	–
	Mindestwirkungsgrade	o	–
	Kohleausstiegsgesetz	o	–
Instrumente zur Begrenzung der jährlichen Vollbenutzungstunden	Klimaschutzbeitrag	+	–
	Mengenbasierte CO <sub>2</sub> -Grenzwerte (absolut)	o	–

SRU 2017; Datenquelle: HERMANN et al. 2017; OEI et al. 2014; 2015a; 2015b; HORST et al. 2015; OEI 2016

Struktureffekte in den Braunkohleregionen besser abgefangen werden. Da die Steinkohlekraftwerke weniger lokal konzentriert sind und der Steinkohlebergbau in Deutschland 2018 beendet wird, treten in der Steinkohlewirtschaft nur geringe lokale Struktureffekte auf.

- o Die Begrenzung der jährlichen Laufzeiten der Kohlekraftwerke durch maximale Strommengen (MWh) oder maximale CO<sub>2</sub>-Mengen (t CO<sub>2</sub>) pro Jahr: Dies reduziert die Emissionen, ohne eine direkte Schließung des Standortes zu bedingen. Ein Großteil der Beschäftigten kann so weiterhin bis zur endgültigen Schließung am Standort beschäftigt werden. Bei zu starker Reduktion der möglichen Einnahmen können einzelne Standorte allerdings unrentabel werden.

**59.** In die öffentliche Diskussion darüber, wie diese Wege beschritten werden können, wurde eine Vielzahl möglicher Instrumente eingebracht (OEI et al. 2014; 2015a; 2015b; Agora Energiewende 2016a; HORST et al. 2015; OEI 2016; HERMANN et al. 2017):

- o Der vom Bundeswirtschaftsministerium Anfang 2015 vorgeschlagene nationale Klimaschutzbeitrag griff verschiedene bisher diskutierte Möglichkeiten auf. Der Vorschlag zielte auf eine zusätzliche Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kohlekraftwerken, um hierdurch die Auslastung der älteren Kohlekraftwerke abzusenken.
- o Stattdessen wurde 2016 die Sicherheitsbereitschaft – auch als „Kohlereserve“ bezeichnet – eingeführt. Dieses Instrument ist vergleichbar mit einer „Abwrack-

prämie“ für die ältesten Braunkohlekraftwerke, welche gegen eine Zahlung der Bundesregierung nach einer vierjährigen Reservetätigkeit stillgelegt werden.

- o Spezifische CO<sub>2</sub>-Grenzwerte wurden in einigen Bundesstaaten in den USA und in Kanada für Neubauten eingeführt und begrenzen die ausgestoßene Menge CO<sub>2</sub> pro erzeugter Megawattstunde Strom. Durch die gewählten Grenzwerte, die den spezifischen Emissionen moderner Gaskraftwerke entsprechen, wurde der Bau von Kohlekraftwerken faktisch verboten. In Deutschland könnte somit der von RWE weiterhin geplante Neubau des Braunkohlekraftwerks BoA Plus am Standort Niederaußem (1.100 MW) verhindert werden.
- o Absolute, mengenbasierte CO<sub>2</sub>-Grenzwerte wurden in Großbritannien eingeführt. Sie beschränken die maximale jährliche Menge CO<sub>2</sub> pro installiertem Megawatt Leistung. Dies führt dazu, dass bei den gewählten Parametern die betroffenen Kohlekraftwerke in ihrer Auslastung ungefähr bei 50 % der jährlichen Maximalauslastung gedeckelt werden.
- o Es wurden außerdem Mindestwirkungsgrade (oder vergleichbare technische Anforderungen) diskutiert, weil viele Kohlekraftwerke schlechtere Wirkungsgrade oder längere Hochfahrzeiten als Gaskraftwerke besitzen. Die Treffsicherheit solcher Instrumente ist jedoch schwieriger sicherzustellen als bei den anderen vorgestellten Instrumenten, weil die verschiedenen Typen von Gaskraftwerken sehr unterschiedliche Werte aufweisen. So besitzen GuD-Kraftwerke sehr hohe Wir-

kungsgrade, sind in ihren Hochfahrzeiten jedoch deutlich langsamer als offene Gasturbinen und eher vergleichbar mit modernen Kohlekraftwerken.

- o Zusätzlich wäre ein Kohleausstiegsgesetz denkbar, das vergleichbar mit dem Atomkonsens aus dem Jahr 2000 Reststrom- oder Rest-CO<sub>2</sub>-Mengen für die verbleibenden Kohlekraftwerke festschreibt. Durch das Übertragen von Laufzeiten zwischen Blöcken oder zwischen Revieren und Unternehmen könnten den Betreibern zusätzliche Freiheiten gewährt werden, ohne die Gesamtemissionen zu verändern.

In Tabelle 7 werden die vorgestellten möglichen Instrumente, die sich daraus ergebenden Wege zur Reduktion der Kohleverstromung sowie deren finanzielle Auswirkung zusammenfassend dargestellt. Analysen des Öko-Instituts und des Büros für Energiewirtschaft und technische Planung (BET) für das UBA (HERMANN et al. 2017) zeigen, dass die Auswahl des Instrumentes deutlich größere Verteilungseffekte als Auswirkungen auf die Gesamterzeugungskosten des Stromsystems hat. Dies bezieht sich insbesondere auf die Verschiebung von Deckungsbeiträgen zwischen den Betreibern der konventionellen Kraftwerksflotte. Des Weiteren können einige Instrumente (wie z. B. der Klimabeitrag) dem Staat als zusätzliche Einnahmequelle dienen; diese Einnahmen könnten gezielt für Strukturentwicklungsprogramme oder das Löschen von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten eingesetzt werden. Die Autorinnen und Autoren kommen hierbei zu dem Ergebnis, dass die parallele Abschaltung der ältesten Braun- und Steinkohleanlagen die geringsten volkswirtschaftlichen Auswirkungen und Verteilungseffekte verursacht.

**60.** Im Klimaschutzplan 2050 visiert die Bundesregierung Diskussionen mit allen Betroffenen an, um einen Beschluss zum Kohleausstieg zu verfassen, welcher auf eine breitere Zustimmung in der Gesellschaft bauen kann (s. Kap. 4.2). Der Pfad zu einem vollständigen Kohleausstieg kann ordnungsrechtlich durch unterschiedliche Instrumente umgesetzt werden, die bei richtiger Parametrisierung gleichermaßen geeignet sind. Es ist auch eine Kombination aus verschiedenen Instrumenten denkbar, um eine bessere Treffsicherheit zur Einhaltung eines strukturierten Ausstiegspfades zu gewährleisten. Eine vertiefte inhaltliche sowie rechtliche Bewertung möglicher Instrumente zur Umsetzung des Kohleausstiegs erfolgt im Rahmen dieser Stellungnahme nicht (zu verschiedenen rechtlichen Bewertungen s. HORST et al. 2015; ZIEHM 2014). In Abschnitt 4.1.4 wird eine Empfehlung für einen strukturierten Kohleausstiegspfad auf Basis sozial- und energiepolitischer Erwägungen vorgestellt, der auf einer Kombination der verschiedenen Wege zur Reduktion der Kohleverstromung aufbaut.

### 4.1.3 Neue europäische Standards für Stickstoffoxidemissionen aus Kohlekraftwerken

**61.** Die meisten der in Deutschland zur Stromerzeugung genutzten Kohlekraftwerke sind Großfeuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von über 300 Megawatt thermisch (MW<sub>th</sub>). Großfeuerungsanlagen fallen unter die europäische Richtlinie über Industrieemissionen 2010/75/EU (IE-Richtlinie) und müssen dementsprechend die besten verfügbaren Techniken (BVT) zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung anwenden. Diese BVT werden im Rahmen eines Informationsaustausches zwischen den EU-Mitgliedstaaten und Interessensvertretern diskutiert und dann in den sogenannten BVT-Merkblättern festgelegt und beschrieben. Die in den Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken genannten Emissionsbandbreiten sind bindend für die Mitgliedstaaten (Art. 15 Abs. 3 IE-Richtlinie) und können als Grundlage für die Fortschreibung oder Festlegung EU-weiter Emissionsanforderungen dienen.

Für Großfeuerungsanlagen wurde der abschließende Entwurf für das aktualisierte BVT-Merkblatt im Juni 2016 vorgelegt (EIPPC 2016). Ende April 2017 hat der Ausschuss nach Art. 75 Abs. 2 IE-Richtlinie die Beschlussvorlage der Kommission zu den BVT-Schlussfolgerungen mit einzelnen Änderungen mit der erforderlichen qualifizierten Mehrheit angenommen. Er beschloss damit neue Umweltstandards für Großfeuerungsanlagen, darunter auch strengere Standards für die Emissionen von Staub, von Schwefel- und Stickstoffoxiden sowie die erstmalige europarechtliche Festsetzung von Standards für die Emissionen von Quecksilber (Europäische Kommission 2017). Diese Entscheidung ist im August 2017 als Durchführungsrechtsakt im EU-Amtsblatt veröffentlicht worden. Die neuen Umweltstandards müssen in nationales Recht umgesetzt und von bestehenden Anlagen innerhalb von vier Jahren, das heißt bis 2021, eingehalten werden. Der SRU begrüßt die EU-weite Verschärfung der Umweltstandards für Großfeuerungsanlagen sowie die Einführung von Standards für Quecksilberemissionen. Mit der Minderung der Emissionen an Staub, Schwefeloxiden, Stickstoffoxiden und Quecksilber in Europa kann deren schädlicher Eintrag in die Umwelt reduziert werden (s. a. Kap. 2.2).

**62.** Während die Betriebswerte der deutschen Großfeuerungsanlagen für Schwefeloxide und Staub bereits heute weitgehend im Bereich der durch das aktualisierte BVT-Merkblatt vorgegebenen Emissionsbandbreiten liegen (Europäische Kommission 2017), werden sowohl die neuen Standards für Quecksilber als auch für Stickstoffoxide einen Einfluss auf die Emissionsminderung

bei Kohlekraftwerken in Deutschland haben. Für Quecksilber verschärft sich der in Deutschland ab 2019 für bestehende Großfeuerungsanlagen geltende Jahresmittelwert von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (§ 11 Abs. 1 i. V. m. § 30 Abs. 1 Ziff. 2 13. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV)) auf einen Wert der Emissionsbandbreite von  $< 1\text{--}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für Steinkohlekraftwerke bzw. von  $< 1\text{--}7 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  für Braunkohlekraftwerke (Europäische Kommission 2017, Tab. 10.7).

Bei Stickstoffoxiden müssen Kohlekraftwerke mit einer Feuerungswärmeleistung über  $300 \text{ MW}_{\text{th}}$  ab 2021 zusätzlich zum Tagesmittelwert von  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  (§ 4 Abs. 8 Ziff. 4 13. BImSchV) einen Jahresmittelwert der Emissionsbandbreite von  $< 85\text{--}150 \text{ mg}/\text{m}^3$  einhalten. Allerdings wurde diese Anforderung über eine Fußnote für bestehende Braunkohlestaubfeuerungen mit einer Feuerungswärmeleistung über  $300 \text{ MW}_{\text{th}}$  abgeschwächt: Für sie gilt eine Emissionsbandbreite von  $< 85\text{--}175 \text{ mg}/\text{m}^3$  (Europäische Kommission 2017, Tab. 10.3). In Deutschland liegen die meisten Jahresmittelwerte der bestehenden großen Braunkohlekraftwerke im Bereich zwischen  $160$  und  $190 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Alle Anlagen setzen ausschließlich primäre feuerungstechnische Maßnahmen (z. B. Optimierung der Verbrennungsbedingungen) zur Minderung der Stickstoffoxidemissionen ein (Deutscher Bundestag 2017). Das UBA schätzt, dass bei Festlegung eines nationalen Jahresmittelwerts von  $175 \text{ mg}/\text{m}^3$  nur vier Braunkohlekraftwerksblöcke diesen Grenzwert sicher einhalten würden. Die restlichen betroffenen Braunkohlekraftwerke müssten teils mit abgasseitigen Maßnahmen (Sekundärmaßnahmen) nachgerüstet werden, ein Teil wird aber auch allein mit einer Verbesserung der primären feuerungstechnischen Maßnahmen, das heißt ohne zusätzliche Abgasreinigung, der Anforderung genügen können. Mit einem Jahresmittelwert von  $175 \text{ mg}/\text{m}^3$  würden die Stickstoffoxidemissionen der in Deutschland betriebenen Braunkohlekraftwerke um circa 5 % sinken (schriftliche Mitteilung des UBA vom 13. Juli 2017); bzw. nach einer anderen Schätzung um 7 % (DNV GL – Energy 2016).

**63.** Für die abgasseitige Reduktion der Stickstoffoxidemissionen gibt es zwei Techniken: die selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) und die selektive katalytische Reduktion (SCR). Das SCR-Verfahren ist effektiver in Bezug auf die Minderung von Stickstoffoxiden (im Allgemeinen 80–95 % im Vergleich zu 30–50 % beim SNCR-Verfahren), dafür aber auch deutlich teurer als das SNCR-Verfahren (EIPPC 2016, S. 215 ff.). Nach einer europäischen Studie betragen die Investitionskosten für eine SNCR-Abgasreinigung (inklusive Primärmaßnahmen) pro installiertem Kilowatt elektrischer Leistung ( $\text{kW}_{\text{el}}$ ) 50 Euro, die Kosten für eine SCR-Abgasreinigung (ohne Primärmaßnahmen) werden auf 120 Euro pro  $\text{kW}_{\text{el}}$  geschätzt (DNV GL – Energy 2016). Im oben ge-

nannten Entwurf des BVT-Merkblatts sind beide Abgasreinigungstechniken als BVT für Großfeuerungsanlagen über  $300 \text{ MW}_{\text{th}}$ , die unter Volllast laufen, aufgeführt (mit wenigen technisch bedingten Ausnahmen bei der SNCR-Technik). Mit dem Einbau eines SCR-Systems, wie es in Deutschland bei Steinkohlekraftwerken größer  $300 \text{ MW}_{\text{th}}$  bereits üblich ist, könnten in Braunkohlekraftwerken Jahresmittelwerte unter  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  erreicht werden. Eine Absenkung des derzeitigen Stickstoffoxidgrenzwertes bei großen Braunkohleanlagen von 200 auf  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  könnte zu einer Minderung der Stickstoffoxidemissionen um rund 26 % führen (SRU 2015b, Tz. 549).

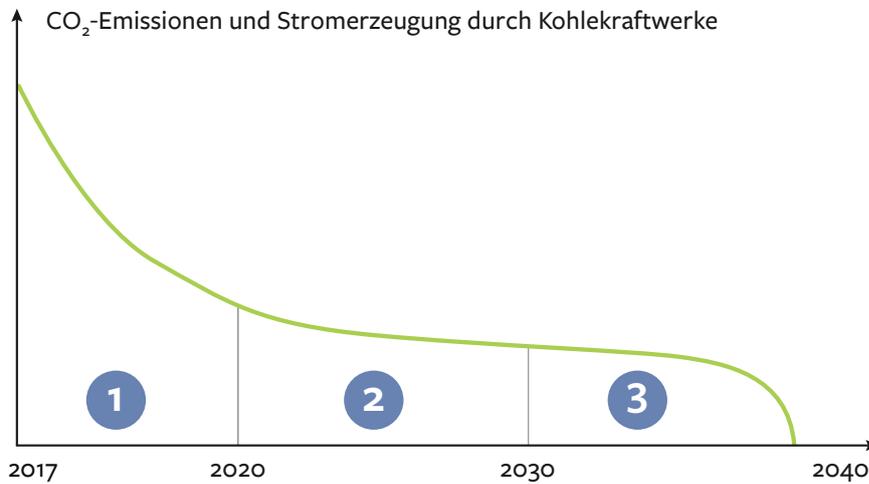
**64.** Aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes ist eine weitere deutliche Minderung der Stickstoffoxidemissionen sinnvoll und notwendig (Kap. 2.2). Der SRU hält es daher für gerechtfertigt, wenn die bestehenden Braunkohlekraftwerke in Deutschland mit der SCR-Technik nachgerüstet werden. Dafür müsste die Bundesregierung im Rahmen der Umsetzung der neuen EU-Standards für Großfeuerungsanlagen den Grenzwert für Stickstoffoxidemissionen bei Braunkohlekraftwerken ambitionierter gestalten – etwa im Bereich von 85 bis  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  – als dies bei bloßer Orientierung an der Obergrenze der EU-rechtlichen Emissionsbandbreite in Höhe von  $175 \text{ mg}/\text{m}^3$  erfolgen würde. Allerdings müssen die Minderungsmaßnahmen bei Kohlekraftwerken immer auch in Kombination mit dem erforderlichen Ausstieg aus der Kohleverstromung diskutiert werden (SCHAIBLE 2017). Es wird bei einem strukturierten Ausstieg Braunkohlekraftwerke geben, die in wenigen Jahren ohnehin vom Netz gehen oder bei denen begrenzte Restlaufzeiten mit verringerten Betriebsstunden verknüpft werden. Für diese Anlagen wären die Investitionskosten für eine Abgasreinigung wie die SCR-Technik nicht vertretbar. In diesen Fällen sollten Ausnahmen vom ambitionierteren Stickstoffoxidgrenzwert möglich sein, die Anlagen sollten allerdings bis zum Ende ihrer Laufzeit die verfügbaren primären feuerungstechnischen Maßnahmen zur Begrenzung der Stickstoffoxidemissionen anwenden.

### 4.1.4 Empfehlung für einen Kohleausstieg in drei Phasen

**65.** Ein strukturierter Pfad, um die Kohleverstromung zu beenden, der die klimapolitische Notwendigkeit ernst nimmt und regionale, soziale und technische Herausforderungen mit einbezieht, kann vereinfacht in drei Phasen unterteilt werden (siehe Abb. 5). Aufgrund des langen Planungszeitraumes von bis zu zehn Jahren zur Anpassung der Braunkohleförderung in den Tagebauen sollte ein an diesen Phasen angelegter Kohleausstieg

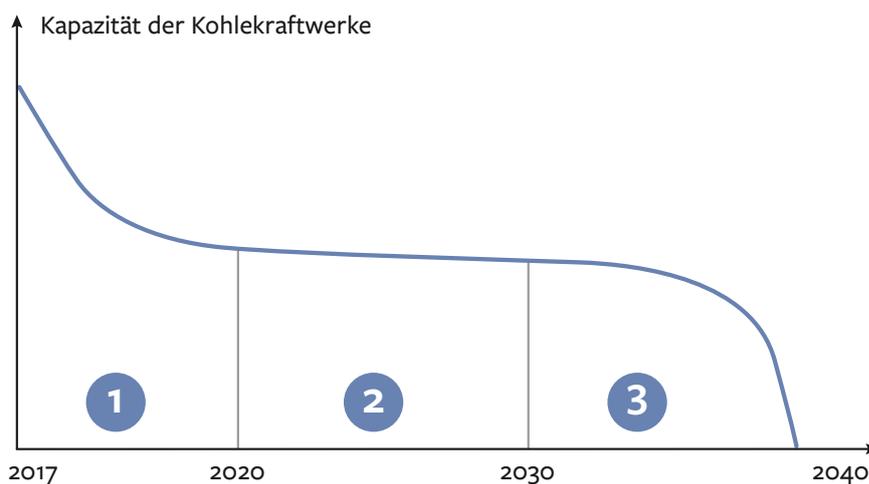
o **Abbildung 5**

Schrittweise Abschaltung der Kohlekraftwerke in 3 Phasen

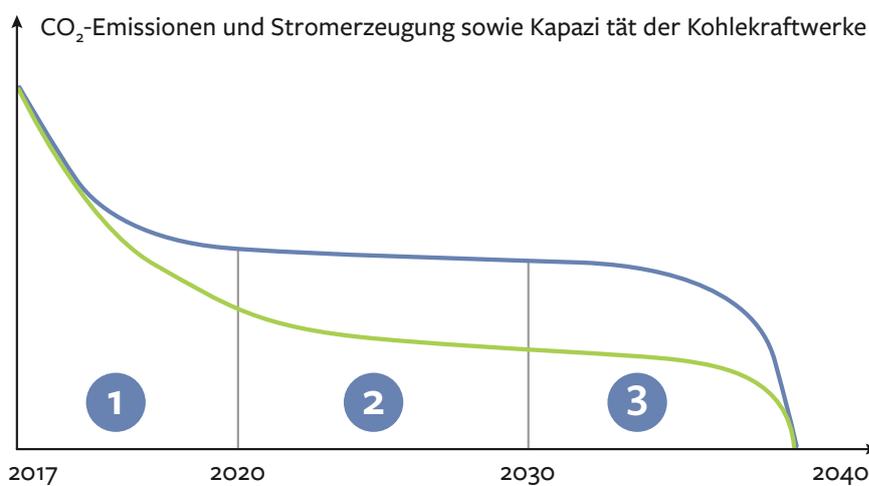


**Einhaltung eines Kohleausstiegs für Deutschland in drei Phasen bei Einhaltung eines Emissionsbudgets von 2.000 Mt CO<sub>2</sub>**

**Phase 1:** Schnellstmögliche Abschaltung der ältesten Anlagen  
 → Einhaltung vom 2020 Klimaschutzziel und der neuen EU Schadstoffgrenze



**Phase 2:** Drosselung der Anlagenleistung bei Kapazitätsvorhaltung  
 → Sicherung von Arbeitsplätzen und Unterstützung der Versorgungssicherheit



**Phase 3:** Kohleausstieg  
 → Ein strukturierter Kohleausstiegsplan schafft für Betroffene Planungssicherheit

**Legende:** — CO<sub>2</sub>-Emissionen und Stromerzeugung  
— Kapazität der Kohlekraftwerke

schnellstmöglich verabschiedet werden, um Strukturbrüche zu vermeiden:

Phase 1: Abschaltung der ältesten Anlagen bis 2020, um einen Teil der Lücke zum 40 %-Reduktionsziel zu schließen. Hiermit wird gleichzeitig erreicht, dass ältere Braunkohlekraftwerke, bei denen sich eine Nachrüstung mit einer Abgasreinigung (SCR oder SNCR) nicht lohnt und die deswegen den ab 2021 einzuhaltenden ambitionierten  $\text{NO}_x$ -Wert nicht erreichen können (siehe Abschn. 4.1.3), vom Netz gehen. Vorhandene Überkapazitäten sorgen dafür, dass keine Versorgungsengpässe entstehen.

Phase 2: Rückgang der Auslastung der verbliebenen Kohlekraftwerke in den 2020er-Jahren, um die Kohleverstromung kontinuierlich zu reduzieren. Diese moderneren Anlagen müssen – sofern noch nicht vorhanden – ihre Anlagen mit abgasseitigen Maßnahmen nachrüsten (SCR- oder SNCR-Technik), um den ambitionierten Stickstoffoxidgrenzwert einhalten zu können. Ausnahmen von dieser Nachrüstpflcht sollte es nur für Anlagen geben, die in wenigen Jahren ohnehin vom Netz gehen oder bei denen begrenzte Restlaufzeiten mit verringerten Betriebsstunden verknüpft werden. Diese Anlagen sollten allerdings bis zum Ende ihrer Laufzeit die verfügbaren primären feuerungstechnischen Maßnahmen zur Begrenzung der Stickstoffoxidemissionen anwenden. Durch die Vorhaltung der Kapazitäten besteht trotz des Atomausstiegs keine Gefahr für die Versorgungssicherheit. Darüber hinaus kann durch den Weiterbetrieb der Blöcke auch ein Großteil der Arbeitsplätze erhalten bleiben. Ein mögliches Klimaschutzinstrument hierfür wäre das Festlegen von konkreten  $\text{CO}_2$ -Emissionsbudgets für jeden Kraftwerksblock vergleichbar den in Großbritannien eingeführten mengenbasierten  $\text{CO}_2$ -Grenzwerten (emissions performance standards) (s. Tz. 59; ZIEHM et al. 2014; OEI et al. 2015a). Ein Vorteil dieses Instrumentes ist, dass es eine Abschätzung der noch benötigten Braunkohlemengen pro Kraftwerk und pro Tagebau ermöglicht. So können auch die endgültigen Tagebauanten frühzeitig festgelegt werden, was Vorteile für die Anwohnerinnen und Anwohner (Gewissheit bzgl. möglicher Umsiedlungen), Betreiber (Planung der Wiedernutzbarmachungsarbeiten) und Behörden (Genehmigungsprozesse für die Änderung von Braunkohleplänen) mit sich bringt.

Phase 3: In den 2030er-Jahren werden die verbleibenden Kohlekraftwerke sukzessive geschlossen. Durch die hohen Fixkosten von Tagebauen ist der Weiterbetrieb mit einzelnen verbleibenden Kraftwerksblöcken nur bei sehr hohen Strompreisen und Vollbenutzungsstunden wirtschaftlich. Daher erfolgt das Abschalten der letzten Anlagen in jedem Revier aus technischen und wirtschaftlichen Gründen zeitgleich. Durch ein ambitioniertes Fortschreiben der Energiewende sollten bis in die 2030er-Jahre aus-

reichend Erneuerbare-Energien-Anlagen ans Netz angeschlossen werden, um in Kombination mit Stromspeichern und Nachfragemanagementoptionen die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

In Abbildung 5, welche die drei Phasen skizziert, werden  $\text{CO}_2$ -Emissionen und Stromerzeugung durch Kohlekraftwerke vereinfachend gemeinsam abgebildet. Bei einer Differenzierung würde aufgrund der höheren spezifischen Emissionen der älteren Anlagen der Emissionsverlauf zu Beginn minimal steiler abfallen und dafür später flacher verlaufen.

## 4.2 Kohleausstieg im Konsens

**66.** Die Kohleverstromung ist zu einem bedeutenden gesellschaftlichen Konfliktfeld geworden: In vergleichbaren Situationen, wie dem Ausstieg aus dem Steinkohleabbau und dem Atomausstieg, hat sich eine Einigung zwischen Politik und Betroffenen als sinnvoller Weg erwiesen. Es scheint daher richtig, auch für den Kohleausstiegsprozess eine grundsätzliche Vereinbarung mit betroffenen Akteuren anzustreben und einen darauf ausgerichteten konsultativen Prozess anzustoßen.

### 4.2.1 Mehrwert eines Kohlekonsenses

**67.** Ein Konsens über das Ende der Kohleverstromung, der einen gemeinsam erarbeiteten Ausstiegspfad beschreibt, hätte eine Reihe von Vorteilen:

- Ein Konsens würde eine stabile wirtschaftliche Planungsgrundlage schaffen und damit Investitionssicherheit schaffen. Gesetzgeberische Risiken würden minimiert, die Gefahr kostspieliger Klagen von betroffenen Unternehmen verringert. Ein möglicher polarisierender Konflikt um die Zukunft der Kohle könnte befriedet werden, politisches und gesellschaftliches Vertrauen in die Ernsthaftigkeit der Energiewende würde verbessert.
- Der Rückgang der Kohleverstromung könnte eng an konkrete Maßnahmen zur Abfederung der sozialen und ökonomischen Folgen an den betroffenen Standorten gekoppelt werden. Im Dialog mit Bundesländern, Unternehmen und Gewerkschaften könnten neue wirtschaftliche Perspektiven eröffnet und Ansätze für einen effektiven Einsatz von Fördergeldern entwickelt werden.
- Unter Beteiligung der maßgeblich betroffenen Unternehmen und Arbeitnehmervertretungen könnte im Detail ein Ausstiegspfad ausgearbeitet werden, der die Emissionsminderung möglichst kosteneffizient

umsetzt und die Strukturentwicklung in den einzelnen Braunkohlerevieren gezielt fördert. Dabei könnten Verteilungsfragen zwischen Stein- und Braunkohle einerseits sowie zwischen einzelnen Braunkohlerevieren verhandelt und Kompromisse erzielt werden.

**68.** Das Bundeswirtschaftsministerium hat bereits im „Impulspapier Strom 2030“ die Notwendigkeit eines Dialogs zur Umsetzung der Klimaziele im Strombereich nach 2020 anerkannt (BMWi 2016, S. 12). Im Klimaschutzplan 2050 wurde beschlossen, Anfang 2018 eine Kommission einzurichten, deren Aufgabe es ist, „zur Unterstützung des Strukturwandels einen Instrumentenmix [zu] entwickeln, der wirtschaftliche Entwicklung, Strukturwandel, Sozialverträglichkeit und Klimaschutz zusammen bringt“ (BMUB 2016, S. 36). Mit der Einrichtung einer Kohlekommission würde die Bundesregierung eine Empfehlung aus dem Dialogprozess zum Klimaschutzplan 2050 aufgreifen, die vom Bundesländerforum, dem Bürgerforum und weiteren Akteuren unterstützt wurde („KSP-E-07a: Ausstieg aus der Stromerzeugung durch Kohlekraftwerke – Dialogprozess“, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie et al. 2016, S. 39 ff.). Auch andere Akteure haben in der Vergangenheit vorgeschlagen, den Ausstieg aus der Kohleverstromung in einem breiten gesellschaftlichen Konsens zu entwickeln (u. a. SRU 2015a; Agora Energiewende 2016a). Der SRU begrüßt die geplante Einrichtung der Kommission und macht im Folgenden Vorschläge zu ihrer Ausgestaltung.

#### 4.2.2 Auftrag einer Kohlekommission

**69.** Nach Auffassung des SRU wird eine Kommission zum Ausstieg aus der Kohleverstromung nur erfolgreich sein, wenn sie auf Basis eines klaren politischen Mandats handelt und der Arbeitsauftrag seitens der Politik eindeutig festgelegt ist. Die Kommission kann dazu beitragen, die vielen offenen Fragen des Kohleausstiegs möglichst im Konsens zu klären. Dabei geht es nicht nur um betriebswirtschaftliche Belange der betroffenen Unternehmen, den Erhalt von Arbeitsplätzen und strukturpolitische Gestaltungsmöglichkeiten, sondern auch um die Gewährleistung von Klima- und Umweltschutz.

Die Anforderungen an die zukünftige Strukturpolitik hängen insgesamt und bezogen auf die betroffenen Regionen vom genauen Ausstiegsfahrplan sowie dem Enddatum des Kohleausstiegs ab. Anders als bisher im Klimaschutzplan 2050 vorgesehen erscheint es daher sinnvoll, von Anfang an den Kohleausstiegsplan in die Gespräche der Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Regionalentwicklung einzubeziehen. So kann verhindert werden, dass gegebenenfalls eine strukturpolitisch motivierte Vereinbarung getroffen wird, welche den klimapolitischen Not-

wendigkeiten nicht gerecht wird. Mit Blick auf den Handlungsdruck, die Klimaschutzziele und das verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget ist es aus Sicht des SRU erforderlich, in der jetzt beginnenden Legislatur nicht nur einen Beschluss zum Ausstieg aus der Kohleverstromung zu fassen, sondern auch einen verbindlichen Ausstiegsplan zu vereinbaren. Die Bundesregierung sollte daher vorab verbindlich festlegen, welchen Beitrag zum Klimaschutz der Kohlesektor leisten soll, das heißt welches verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget der Kohleverstromung zugesprochen wird. Dabei ergibt sich der notwendige Beitrag der Kohleverstromung zur Energiewende aus dem Kontext einer Gesamtstrategie für den langfristigen Klimaschutz. Diese Entscheidung geht notwendigerweise über die Zuständigkeit einer solchen Kohlekommission hinaus. Die Vorgabe entlastet die Beteiligten von der Frage des „Ob“ und schärft den Fokus auf die Frage „Wie“ ein Kohleausstieg erfolgen kann.

Der SRU empfiehlt daher den Regierungsparteien, den Kohleausstieg im Koalitionsvertrag als eine prioritäre Aufgabe festzuhalten. Dort sollte ein verbindliches CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget für die Kohleverstromung für den Zeitraum 2015 bis 2040 festgelegt werden, das mit den nationalen und internationalen Klimaschutzziele vereinbar ist (Abschn. 2.1.3). Ein weiterer Vorteil des Budgetansatzes ist, dass so für die Braunkohle die zukünftig noch benötigten Tagebauflächen errechnet werden können. Dies führt zu mehr Planungssicherheit für zum Teil noch von Umsiedlungen bedrohte Bürgerinnen und Bürger und für die Wiedernutzbarmachungsvorhaben der Bergbauunternehmen.

Auf Basis dieses vorgegebenen Gesamtbudgets könnte es Aufgabe der Kommission sein:

- einen volkswirtschaftlich effizienten und hinsichtlich der Verteilungsgerechtigkeit akzeptablen Pfad für eine schrittweise Minderung der Verstromung von Braun- und Steinkohle zu entwickeln. Der Pfad sollte Arbeitsplatzverluste von Beschäftigten im Braunkohleabbau, in den Kraftwerken sowie in den entsprechenden Wertschöpfungsketten möglichst gering halten und die Versorgungssicherheit gewährleisten (SRU 2015a).
- Investitionsfelder in den betroffenen Braunkohleregionen zu identifizieren, übergeordnete Strategien zur Unterstützung des regionalen Strukturwandels zu entwickeln und deren Finanzierungsbedarf abzuschätzen. Dabei sollte sie Expertise aus den betroffenen Regionen und der Wissenschaft einbeziehen. Zudem sollte sie Maßnahmen zur sozialen Abfederung des Kohleausstiegs identifizieren.
- untersuchen zu lassen, inwiefern die Folgekosten des Kohlebergbaus (Wiedernutzbarmachung und langfris-

tige Folgekosten, vgl. Abschn. 3.1.4) durch die gebildeten Rückstellungen gedeckt werden können. Sie sollte Wege aufzeigen, wie die Folgekosten wie vom Gesetzgeber vorgesehen von den Bergbauunternehmen übernommen werden, sodass sie nicht auf öffentliche Haushalte abgewälzt werden.

**70.** Es sollte vermieden werden, die Kommission mit einem fachlich zu breiten Mandat zu überlasten. Nicht alle sich beim Kohleausstieg ergebenden Fragen können im Rahmen einer solchen Kommission beantwortet werden. So können nicht alle Herausforderungen des Strukturwandels in einer nationalen Kohlekommission abschließend gelöst werden. Die Folgen des vereinbarten Kohleausstiegspfades und die notwendigen strukturellen Strategien sollten daher im Anschluss in regionalen Prozessen unter Beteiligung der relevanten Akteure präzisiert werden. Auch die zukünftige Gestaltung des Strommarktes sollte in den Dialogprozess nicht einbezogen werden. Vielmehr kann erst eine verbindliche Entscheidung über das Ende der Kohleverstromung und den damit verbundenen Ausstiegspfad Grundlage zukünftiger Verhandlungen über das Strommarktdesign sein.

### 4.2.3 Mitglieder und Arbeitsweise der Kommission

**71.** Die Legitimität und Stabilität von Verhandlungsergebnissen hängt nicht nur von Inhalt und Wirkung ab, sondern auch maßgeblich davon, ob der Prozess gesellschaftlich als legitim anerkannt wird. Es ist daher wichtig, wie die Zusammensetzung und Arbeitsweise einer solchen Kommission ausgestaltet sind. Die Federführung für die Kohlekommission sollte gemeinsam von den Ressorts wahrgenommen werden, die für die Energiepolitik und den Klimaschutz zuständig sind (also derzeit das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). Andere relevante Ministerien – das Finanz-, Gesundheits- und das Arbeits- und Sozialressort – sowie die Bundesländer müssen frühzeitig beteiligt werden.

Die Zahl der Kommissionsmitglieder sollte zwar begrenzt sein, gleichzeitig ist es erforderlich, dass die Kommission die wichtigsten betroffenen Gruppen repräsentiert. Nur dann ist es möglich, einen breit getragenen Konsens zu erzielen. Beteiligt sein sollten Vertreterinnen und Vertreter folgender Gruppen: Bund, Länder, betroffene Regionen, Braun- und Steinkohlewirtschaft, Umweltverbände, Gewerkschaften und Wissenschaft (vgl. SRU 2015a, Tz. 41 f.). Bislang sieht die im Klimaschutzplan vorgesehene Kommission die Mitwirkung der Zivilgesellschaft – mit der Ausnahme regionaler Akteurinnen und Akteure –

nicht vor. Da der Ausstieg aus der Kohleverstromung dazu dient umweltpolitische Ziele zu erreichen, ist aus Sicht des SRU die Beteiligung von Umweltverbänden für eine starke gesellschaftliche Akzeptanz und Legitimität des Gremiums erforderlich (SRU 2015a). Zu einer ausgewogenen Besetzung des Gremiums würde zudem beitragen, wenn betroffene Unternehmen durch eine gemeinsame Interessensvertretung bei Verhandlungen agieren. So kann zudem sichergestellt werden, dass sowohl Interessen der Kraftwerksbetreiber als auch der entsprechenden Tagebaue im Blick behalten werden. Ähnlich sollte auch bei der Auswahl der beteiligten Gewerkschaften verfahren werden, sie sollten sowohl die Interessen der Mitarbeitenden der Kraftwerke wie auch der Tagebaue vertreten.

**72.** Der durch die Kommission initiierte Dialogprozess bietet den Betroffenen die Gelegenheit von Verhandlungen „im Schatten der Hierarchie“ (MAYNTZ und SCHARPF 1995), wie sie beispielsweise beim ursprünglichen Atomausstieg erfolgreich gewesen sind (vgl. TÖLLER 2012). Allerdings ist nicht zu erwarten, dass die am Status quo orientierten und von einem Kohleausstieg primär negativ betroffenen Bergbauunternehmen, Gewerkschaften, Betreiber von Kohlekraftwerken und Vertretungen der betroffenen Regionen hohes Interesse am Erzielen einer einvernehmlichen Lösung zeigen. Für das Verhalten der Verhandelnden ist entscheidend, welche Folgen im Falle eines Scheiterns der Kommission drohen (BENZ 2007, S. 113 ff.). Daher sollte deutlich werden, dass die Kommission den Betroffenen die Möglichkeit eröffnet, den Ausstiegspfad durch Vorschläge mitzugestalten. Wenn die Kommission nicht zu einvernehmlichen Vorschlägen kommt, ist es Aufgabe der Bundesregierung, einen mit dem CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget kompatiblen Ausstiegspfad festzulegen. Letztlich muss der Kohleausstieg durch Verabschiedung eines entsprechenden Gesetzes vom Bundestag mit möglichst breiter Mehrheit getragen werden.

**73.** Die Kommission sollte durch ein kleines wissenschaftliches Begleitgremium unterstützt werden, das die Vereinbarkeit der besprochenen Positionen mit den rechtlichen Vorgaben untersucht und auf die politischen Vorgaben hin bewertet. Insbesondere sollte das Begleitgremium sicherstellen, dass der vereinbarte Ausstiegspfad mit dem von der Bundesregierung vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget konsistent ist. Kurzfristig verfügbarer Sachverstand wird voraussichtlich auch im Hinblick auf Rückstellungen für Folgekosten erforderlich sein.

**74.** Die Transparenz der Arbeitsweise ist sowohl unter verhandlungs- als auch demokratietheoretischen Gesichtspunkten zu betrachten. Aus demokratischer Sicht erhöht Transparenz generell die Legitimität von Verfah-

ren. Sie trägt zudem dazu bei, dass der Modus des Tauschgeschäfts („Bargaining“) weniger dominant ist, da die Öffentlichkeit von den Teilnehmenden deliberative, verständigungsorientierte Verhandlungen („Arguing“) einfordert (ELSTER 1998, S. 111). Allerdings erhöhen Verhandlungen hinter geschlossenen Türen tendenziell den Verhandlungsspielraum der Teilnehmenden (PUTNAM 1988). Um die Legitimität der Kommission abzusichern, ist aus Sicht des SRU ein Mindestmaß an Transparenz si-

cherzustellen, ohne die vertrauensvolle Zusammenarbeit der Kommission zu gefährden. So könnten beispielsweise Tagesordnung und Ergebnisprotokoll der jeweiligen Kommissionssitzung veröffentlicht werden. Die Einschätzungen des wissenschaftlichen Begleitgremiums sollten der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen. Dadurch wird eine transparente und umfassende gesellschaftliche und politische Debatte über die Verhandlungen ermöglicht.

## 5 Handlungsempfehlungen

**75.** Um einen angemessenen Beitrag zum globalen Klimaschutz zu leisten, muss Deutschland die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs schnell verringern und sein Wirtschaftssystem bis 2050 weitestgehend treibhausgasneutral gestalten. Es besteht allerdings die Gefahr, dass Deutschland seine nationalen Klimaschutzziele für 2020 und 2030 nicht einhalten kann. Die neue Bundesregierung sollte folglich unverzüglich einen Kohleausstieg einleiten, um einen wichtigen Schritt Richtung Zielerreichung zu gehen. Eine zügige Reduzierung der Kohleverstromung würde nicht nur große Emissionsreduktionen zu relativ geringen Kosten liefern, sondern hätte zudem erhebliche positive Wirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit sowie energiewirtschaftliche Vorteile.

**76.** Der SRU spricht sich dafür aus, den Ausstieg aus der Kohleverstromung in drei Phasen durchzuführen: Im Zeitraum bis 2020 sollten die ältesten, ineffizientesten und CO<sub>2</sub>-intensivsten Kohlekraftwerke stillgelegt werden. In der zweiten Phase bis 2030 sollten die verbliebenen Kohlekraftwerke mit verminderter Auslastung betrieben werden, aber zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit größtenteils am Netz bleiben. In der dritten Phase werden die übrigen Kohlekraftwerke im Verlauf der 2030er-Jahre sukzessive geschlossen. Das genaue Abschaltjahr des letzten Kohlekraftwerks muss von der Bundesregierung beschlossen werden, ist jedoch zweitrangig, solange ein mit dem Klimaabkommen von Paris im Einklang stehendes CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget eingehalten wird. Die dabei entstehenden Herausforderungen im Hinblick auf die Versorgungssicherheit und die wirtschaftliche Entwicklung in den Braunkohleregionen sind ernst zu nehmen, können aber bewältigt werden.

**77.** Die neue Bundesregierung sollte zudem – wie im Klimaschutzplan 2050 vorgesehen – eine Kommission einsetzen, um die notwendigen Entscheidungen in Konsultation mit den betroffenen Akteuren zu treffen. Dabei sollte eine solche Kommission auf Basis eines klaren politischen Mandats handeln. Eine zentrale, der Kommission vorzugebende Rahmenbedingung ist ein für die Kohleverstromung verbleibendes CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget. Aus wissenschaftlicher Sicht sollten die kumulativen Emissionen der Kohleverstromung bis zu deren Auslaufen 2.000 Mt CO<sub>2</sub> nicht überschreiten. Die Kommission sollte Empfehlungen für einen konkreten Ausstiegspfad, zur instrumentellen Ausgestaltung sowie zur Abfederung der sozialen und ökonomischen Folgen in den betroffenen Regionen erarbeiten.

## 6 Literatur

---

- AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2017): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern. Stand: 07.02.2017. Berlin, Köln: AGEB. [http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=20170207\\_brd\\_stromerzeugung1990-2016.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20170207_brd_stromerzeugung1990-2016.pdf) (14.06.2017).
- Agora Energiewende (2017): Energiewende 2030: The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende. Berlin: Agora Energiewende. Impulse.
- Agora Energiewende (2016a): Elf Eckpunkte für einen Kohlekonsens. Konzept zur schrittweisen Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors (Langfassung). Version 1.2. Berlin: Agora Energiewende. Impulse 1/2016.
- Agora Energiewende (2016b): The Power Market Pentagon. A Pragmatic Power Market Design for Europe's Energy Transition. Berlin: Agora Energiewende. Impulse.
- Agora Verkehrswende (2017): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende. Berlin: Agora Verkehrswende.
- Amann, M., Wagner, F. (2014): A Flexibility Mechanism for Complying with National Emission Ceilings for Air Pollutant Version 1.0. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis. TSAP Report 15.
- Augustin, J., Paesel, H. K., Mücke, H.-G., Grams, H. (2011): Anpassung an die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels. Untersuchung eines Hitzewarnsystems am Fallbeispiel Niedersachsen. Prävention und Gesundheitsförderung 6 (3), S. 179–184.
- Augustin, J., Sauerborn, R., Burkart, K., Endlicher, W., Jochner, S., Koppe, C., Menzel, A., Mücke, H.-G., Herrmann, A. (2017): Gesundheit. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 137–150.
- Beelen, R., Hoek, G., Brandt, P. A. van den, Goldbohm, R. A., Fischer, P., Schouten, L. J., Jerrett, M., Hughes, E., Armstrong, B., Brunekreef, B. (2008): Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study). *Environmental Health Perspectives* 116 (2), S. 196–202.
- Benz, A. (2007): Verhandlungen. In: Benz, A., Lütz, S., Schimank, U., Simonis, G. (Hrsg.): Handbuch Governance. Theoretische Grundlagen und empirische Anwendungsfelder. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 106–118.
- Bezirksregierung Köln (2017): Gebietsbezogene Gesamtstrategie zur Verbesserung der Luftqualität im Rheinischen Braunkohlerevier. Sachstand Mai 2017. Köln: Bezirksregierung.
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) (2008): Verbrauchertipp für Schwangere und Stillende, den Verzehr von Thunfisch einzuschränken, hat weiterhin Gültigkeit. Berlin: BfR. Stellungnahme 041/2008.
- Binder, M., Schucht, S. (2001): Coal and Steel in Western Europe. In: Binder, M., Jänicke, M., Petschow, U. (Hrsg.): Green Industrial Restructuring. International Case Studies and Theoretical Interpretations. Berlin: Springer, S. 243–286.
- Blanke, M., Kadler, A., Steinhuber, U. (2010): Zwei Jahrzehnte Braunkohlesanierung. Eine Zwischenbilanz. Senftenberg: Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwertungsgesellschaft.
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Die Minamata-Konvention – das weltweite Übereinkommen zu Quecksilber. Stand: 15.03.2017. Berlin: BMUB. <http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheits-chemikalien/chemikaliensicherheit/quecksilber-konvention/> (10.04.2017).
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: BMUB. [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMUB/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMUB/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) (27.09.2016).
- BMUB, UBA (Umweltbundesamt) (2013): Wasserwirtschaft in Deutschland. Teil 2: Gewässergüte. Bonn: BMUB. [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/wasserwirtschaft\\_in\\_deutschland\\_teil\\_2\\_gewaesserguete.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/wasserwirtschaft_in_deutschland_teil_2_gewaesserguete.pdf) (02.07.2014).
- BMW i (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2016): Impulspapier Strom 2030. Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre. Berlin: BMW i.
- BMW i (2014): Die Energie der Zukunft. Ein gutes Stück Arbeit. Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende. Berlin: BMW i.
- Boshold, A. (1999): Industrie-Tourismus im Lausitzer Braunkohlenrevier: Perspektiven zum Strukturwandel einer ostdeutschen Industrieregion. Berlin: Trescher.
- Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.) (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Briese, D., Herden, A., Esper, A. (2014): Markt für Sekundärrohstoffe in der Baustoffindustrie bis 2020 – Kraftwerksnebenprodukte, MVA-Schlacken und Recycling-Baustoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, S. 117–128.
- Buchert, M., Sutter, J., Alwast, H., Schütz, N., Weimann, K. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. Endbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 33/2017. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24\\_texte\\_33-2017\\_gipsrecycling.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_33-2017_gipsrecycling.pdf) (13.06.2017).
- Bundesanzeiger (23.05.2017): RWE Power Aktiengesellschaft, Essen und Köln. Jahresabschluss zum Geschäftsjahr vom 01.01.2016 bis zum 31.12.2016. <https://www.bundesanzeiger.de/ebanzwww/wexsservlet> (07.08.2017).
- Bundesanzeiger (28.12.2016): Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH, Zeitz. Jahresabschluss zum Geschäftsjahr vom 01.01.2015 bis zum 31.12.2015. Lagebericht. <https://www.bundesanzeiger.de/ebanzwww/wexsservlet> (07.08.2017).
- Bundesanzeiger (15.11.2016): Lausitz Energie Bergbau AG (vormals: Vattenfall Europe Mining Aktiengesellschaft), Cottbus. Jahresabschluss zum Geschäftsjahr vom 01.01.2016 bis zum 31.05.2016. <https://www.bundesanzeiger.de/ebanzwww/wexsservlet> (07.08.2017).
- Bundesnetzagentur (2017): Kraftwerksliste. Stand: 19.04.2017. Bonn: Bundesnetzagentur. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html;jsessionid=A79272223AFB2A2BAAD661CCCC13CAD6#doc266910bodyText1](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html;jsessionid=A79272223AFB2A2BAAD661CCCC13CAD6#doc266910bodyText1) (30.07.2017).
- Bundesnetzagentur (2016): Versorgungsqualität – SAIDI-Werte 2006–2015. Stand: 20.10.2016. Bonn: Bundesnetzagentur. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Versorgungsqualitaet/Versorgungsqualitaet-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Versorgungsqualitaet/Versorgungsqualitaet-node.html) (16.06.2017).
- Bundesnetzagentur (2015): Feststellung des Bedarfs an Netzreserve für den Winter 2015/2016 sowie die Jahre 2016/2017 und 2019/2020 und zugleich Bericht über die Ergebnisse der Prüfung der Systemanalysen. Bonn: Bundesnetzagentur.
- Caldecott, B., Tulloch, D. J., Bouveret, G., Pfeiffer, A., Kruitwagen, L., McDaniels, J., Dericks, G. (2017): The fate of European coal-fired power stations planned in the mid-2000s: Insights for policymakers, companies, and investors considering new coal. Working paper. Oxford: Smith School of Enterprise, University of Oxford. <http://www.smithschool.ox.ac.uk/research-programmes/stranded-assets/The-fate-of-European-coal-fired-power-stations-planned-in-the-mid-2000s-Working-Paper.pdf> (05.09.2017).
- Carocci, A., Rovito, N., Sinicropi, M. S., Genchi, G. (2014): Mercury toxicity and neurodegenerative effects. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 229, S. 1–18.
- CE Delft, Microeconomics (2016): Refining Short-Term Electricity Markets to Enhance Flexibility. Berlin: Agora Energiewende.
- Cowart, R., Buck, M., Carp, S. (2017): Aligning Europe's Policies for Carbon, Efficiency, and Renewables: Creating a „Virtuous Cycle“ of Performance and Emissions Reduction. Montpellier, Berlin, London: Regulatory Assistance Project, Agora Energiewende, Sandbag. <http://www.raonline.org/wp-content/uploads/2017/06/rap-cowart-buck-carp-aligning-europe-policies-virtuous-cycle-2017-june-final.pdf> (30.07.2017).
- Dehnen, N., Mattes, A., Traber, T. (2015): Die Beschäftigungseffekte der Energiewende. Eine Expertise für den BWE und die Deutsche Messe AG. Berlin: DIW Econ. <https://diw-econ.de/wp-content/uploads/2015/04/20150414-diw-econ-beschaeftigungseffekte-energie-wende-expertise1.pdf> (05.09.2017).
- dena (Deutsche Energie-Agentur) (2014): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Endbericht. Berlin: dena.
- Deutscher Bundestag (2017): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Annalena Baerbock, Oliver Krischer, Peter Meiwald, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/11967 – Umweltstandards für Kohlekraftwerke. Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 18/12337.
- Deutscher Bundestag (2016): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Peter Meiwald, Bärbel Höhn, Friedrich Ostendorff, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Luftschadstoffe – Umsetzung der NEC-Richtlinie und Ziele 2030. Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 18/7320.
- Deutscher Bundestag (2014): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Annalena Baerbock, Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/2315 – Import von Steinkohle nach Deutschland. Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 18/2518.

- Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2017): Steinkohlesubventionen. Berlin: Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste. Dokumentation WD 5-3000-033/17.
- Deuschländer, T., Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 47–56.
- DNV GL – Energy (2016): Fact-based scenario to meet commitments under the LCP BREF. Hard coal/lignite fired power plants in EU28. Arnheim: DNV GL – Energy. 16-1213, Rev. 2.
- Drasch, G., Schupp, I., Höfl, H., Reinke, R., Roider, G. (1994): Mercury burden of human fetal and infant tissues. *European Journal of Pediatrics* 153 (8), S. 607–610.
- Ecke, J., Klein, S., Klein, S. W., Steinert, T. (2017): Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten. Eine enervis-Studie. Berlin: enervis energy advisors.
- EEA (European Environment Agency) (2017): NEC Directive reporting status 2017. The need to reduce air pollution in Europe. Briefing. Copenhagen: EEA. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/national-emission-ceilings/nec-directive-reporting-status#tab-data-visualisations> (01.08.2017).
- EEA (2013): Air quality in Europe – 2013 report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EEA Report 9/2013.
- EFSA (European Food Safety Authority) (2012): Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. *The EFSA Journal* 10 (12), S. 1–241.
- EIPPC (European IPPC Bureau) (2016): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Final Draft (June 2016). Sevilla: European Commission, Joint Research Centre. [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP\\_FinalDraft\\_06\\_2016.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP_FinalDraft_06_2016.pdf) (16.06.2017).
- Eis, D., Helm, D., Laußmann, D., Stark, K. (2010): Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Berlin: Robert Koch-Institut.
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Flörke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B. M., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S. N., Haddeland, I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., Olin, S., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Satoh, Y., Schmid, E., Stacke, T., Tang, Q., Wisser, D. (2014): Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (9), S. 3239–3244.
- Elmer, C.-F., Bradke, H., Faulstich, M., Nabitz, L. (2016): Klimaschutz und industrielle Wettbewerbsfähigkeit – Synergien nutzen, Konflikte entschärfen. *Wirtschaftsdienst* 96 (9), S. 667–673.
- Elmer, C.-F., Faulstich, M., Hey, C. (2015): Der Klimabeitrag als Teil des Paradigmenwechsels der internationalen Klimapolitik. *Ökonomisches Optimum oder Realweltanalyse*. ifo Schnelldienst 68 (14), S. 18–22.
- Elster, J. (1998): *Deliberation and Constitution Making*. In: Elster, J. (Hrsg.): *Deliberative democracy*. Cambridge: Cambridge University Press. *Cambridge studies in the theory of democracy* 1, S. 97–122.
- enervis energy advisors (2016): Gutachten: Sozialverträgliche Ausgestaltung eines Kohlekonsenses. Berlin: enervis energy advisors. [https://ver-und-entsorgung.verdi.de/++file++5800cc3e7713b8528b9bcf82/download/Verdi\\_Gutachten%20Sozialvertra%CC%88glicher%20Kohlekonsens\\_Dokumentation\\_gesendet%2022%2009.pdf](https://ver-und-entsorgung.verdi.de/++file++5800cc3e7713b8528b9bcf82/download/Verdi_Gutachten%20Sozialvertra%CC%88glicher%20Kohlekonsens_Dokumentation_gesendet%2022%2009.pdf) (15.06.2017).
- ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) (2016): *Mid-Term Adequacy Forecast*. Ed. 2016. Brüssel: ENTSO-E.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2016): *Integrated Science Assessments for Oxides of Nitrogen – Health Criteria*. Washington, DC: EPA. EPA 600/R-15/068.
- Europäische Kommission (2017): *Commission Implementing Decision of XXX establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants*. Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäische Kommission (2011): *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Energy Roadmap 2050*. COM(2011) 885 final. Brüssel: Europäische Kommission.
- Franke, S., Hackforth, J., Haywood, L. (2017): Arbeitsplätze in der ostdeutschen Braunkohle: Strukturwandel im Interesse der Beschäftigten frühzeitig einleiten. *DIW Wochenbericht* 84 (6–7), S. 115–122.
- Franze, T., Weller, M. G., Niessner, R., Pöschl, U. (2005): Protein nitration by polluted air. *Environmental Science & Technology* 39 (6), S. 1673–1678.
- Fröbel, F., Heinrichs, J., Kreye, O. (1986): *Umbruch in der Weltwirtschaft. Die globale Strategie: Verbilligung der Arbeitskraft, Flexibilisierung der Arbeit, neue Technologien*. Reinbek: Rowohlt. Rororo 5744.

- Gabriel, K. M., Endlicher, W. (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution* 159 (8–9), S. 2044–2050.
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., Luterbacher, J., Fischer, E. M. (2010): A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 40 (4), S. 267–306.
- Gerbaulet, C., Egerer, J., Oei, P.-Y., Paeper, J., Hirschhausen, C. von (2012): Die Zukunft der Braunkohle in Deutschland im Rahmen der Energiewende. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Politikberatung kompakt 69. [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.412261.de/diwkompakt\\_2012-069.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.412261.de/diwkompakt_2012-069.pdf) (16.06.2017).
- Germeshausen, R., Löschel, A. (2015): Energiestückkosten als Indikator für Wettbewerbsfähigkeit. *Wirtschaftsdienst* 95 (1), S. 46–50.
- Gerten, D., Lucht, W., Ostberg, S., Heinke, J., Kowarsch, M., Kreft, H., Kundzewicz, Z. W., Rastgooy, J., Warren, R., Schellnhuber, H. J. (2013): Asynchronous exposure to global warming: freshwater resources and terrestrial ecosystems. *Environmental Research Letters* 8 (3). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034032/pdf> (23.06.2016).
- Greenpeace (2017): Schwarzbuch EPH. Bilanz nach 100 Tagen LEAG (ein Update). Hamburg: Greenpeace.
- Grewe, H. A., Heckenhahn, S., Blättner, B. (2014): Gesundheitsschutz bei Hitzewellen. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie* 47 (6), S. 483–489.
- Hahn, A. (2017): Feinstaub, die neue Bedrohung im Erdzeitalter des Menschen? *Umweltmedizin – Hygiene – Arbeitsmedizin* 22 (2), S. 53–54.
- Harris, A., Hall, S., Brown, K., Munnion, O. (2016): Ditch Coal: The global mining impacts of the UK's addiction to coal. A report by the Coal Action Network. o. O.: Coal Action Network. <http://coalaction.org.uk/ditchcoal.pdf> (05.09.2017).
- Hattermann, F. F., Huang, S., Burghoff, O., Hoffmann, P., Kundzewicz, Z. W. (2016): Brief Communication: An update of the article „Modelling flood damages under climate change conditions – a case study for Germany“. *National Hazards Earth System Science* 16 (7), S. 1617–1622.
- Hauser, E., Leprich, U. (2008): Braunkohleausstieg in Ostdeutschland – technologische, regionalwirtschaftliche und beschäftigungspolitische Konsequenzen einer Umstellung auf eine Stromerzeugung auf Basis Erneuerbarer Energien. Möglicher Beitrag der Technologien zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> zur Reduzierung ostdeutscher Treibhausgasemissionen. Saarbrücken: Institut für ZukunftsEnergieSysteme.
- He, D., Wu, S., Zhao, H., Qiu, H., Fu, Y., Li, X., He, Y. (2017): Association between particulate matter 2.5 and diabetes mellitus: A meta-analysis of cohort studies. *Journal of Diabetes Investigation*. First published online. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28122165> (01.08.2017).
- Heinrich, J., Grote, V., Peters, A., Wichmann, H.-E. (2002): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Langzeiteffekte. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 7 (2), S. 91–99.
- HELCOM (Helsinki-Kommission) (2014): Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011. A concise thematic assessment. Helsinki: HELCOM. *Baltic Sea Environment Proceedings* 143.
- Hermann, H., Loreck, C., Ritter, D., Greiner, B., Keimeyer, F., Cook, V., Bartelt, N., Bittner, M., Nailis, D., Klinski, S. (2017): Klimaschutz im Stromsektor 2030 – Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung. Endbericht. Dessau-Roßlau: UBA. *Climate Change* 02/2017. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11\\_cc\\_02-2017\\_strommarkt\\_endbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_cc_02-2017_strommarkt_endbericht.pdf) (14.06.2017).
- Hirschhausen, C. von, Gerbaulet, C., Kemfert, C., Reitz, F., Schäfer, D., Ziehm, C. (2015): Rückbau und Entsorgung in der deutschen Atomwirtschaft: öffentlich-rechtlicher Atomfonds erforderlich DIW Wochenbericht 82 (45), S. 1072–1082.
- Hobohm, J., Koepp, M., Krampe, L., Mellahn, S., Peter, F., Sakowski, F. (2011): Bedeutung der Braunkohle in Ostdeutschland. Berlin: Prognos AG.
- Hoegh-Guldberg, O., Bruno, J. F. (2010): The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science* 328 (5985), S. 1523–1528.
- Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J. D. (2013): Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environmental Health* 12 (1), S. 43.
- Höhne, N., Luna, L., Fekete, H., Sterl, S., Hare, B., Cantzler, J., Parra, P., Sferra, F., Ancygier, A., Deng, Y., Mir, G. U. R. (2017): Action by China and India slows emissions growth, President Trump's policies likely to cause US emissions to flatten. *Climate Action Tracker Update*. Berlin: NewClimate Institute, Climate Analytics, Ecofys. [http://climateactiontracker.org/assets/publications/briefing\\_papers/CAT\\_2017-05-15\\_Briefing\\_India-China-USA.pdf](http://climateactiontracker.org/assets/publications/briefing_papers/CAT_2017-05-15_Briefing_India-China-USA.pdf) (16.06.2017).
- Hornberg, C., Claßen, T., Steckling, N., Samson, R., McCall, T., Tobollik, M., Meikel, O. C. L., Terschüren, C., Schillmöller, Z., Popp, J., Paetzelt, G., Schümann, M. (2013): Quan-

tifizierung der Auswirkungen verschiedener Umweltbelastungen auf die Gesundheit der Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung der bevölkerungsbezogenen Expositionsermittlung (Verteilungsbasierte Analyse gesundheitlicher Auswirkungen von Umwelt-Stressoren, VegAS). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Schriftenreihe Umwelt & Gesundheit 01/2013.

Hornberg, C., Pauli, A. (2010): Herausforderung Klimawandel – Potenziale und Grenzen von Gesundheitsvorsorge und Anpassung jenseits physikalisch orientierter Klimaforschung. *Verhaltenstherapie & Psychosoziale Praxis* 42 (2), S. 293–296.

Horst, J., Leprich, U., Luxenburger, M., Klann, U., Weber, A., Zipp, A., Klinski, S. (2015): Kraftwerks-Stilllegungen zur Emissionsreduzierung und Flexibilisierung des deutschen Kraftwerksparks: Möglichkeiten und Auswirkungen. Endbericht. Version: 1.3. Saarbrücken, Berlin: Institut für ZukunftsEnergieSysteme.

IG BCE (Industriegewerkschaft Bergbau Chemie Energie) (2014): Neue Ordnung für Verstromung. FAQ aktuell. Geltungsbereich. Wer ist betroffen? IG BCE aktuell 2014 (1), S. 2. <https://www.igbce.de/vanity/renderDownload-Link/4274/74236> (12.07.2017).

Ilyin, I., Rozovskaya, O., Travnikov, O., Varygina, M., Aas, W., Pfaffhuber, K. A. (2016): Assessment of heavy metal transboundary pollution, progress in model development and mercury research. Moscow, Kjeller: Meteorological Synthesizing Centre – East, Norwegian Institute for Air Research. EMEP Status Report 2/2016.

IMU (Institut für Medienforschung und Urbanistik) (2015): Regional- und strukturpolitische Vorschläge zur Entwicklung der Lausitz aus arbeitsorientierter Sicht. Kurzfassung. Berlin: IMU, Arbeitsgruppe regionale Strukturpolitik. [www.igmetall-bbs.de/fileadmin/user/Dokumente/2015\\_0707\\_DGB\\_Lausitzworkshop\\_IMU-Thesen.pdf](http://www.igmetall-bbs.de/fileadmin/user/Dokumente/2015_0707_DGB_Lausitzworkshop_IMU-Thesen.pdf) (14.06.2017).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014): Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, NY: Cambridge University Press.

IPCC (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IRR (Innovationsregion Rheinisches Revier) (2016): Innovationsregion Rheinisches Revier. Sachstand zur Projektqualifizierung im Herbst 2016. Jülich: IRR. [http://rheinisches-revier.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/allgemein/161129\\_innovationsregion\\_rheinisches\\_revier\\_sachstand\\_projektqualifizierung\\_herbst\\_2016\\_WEB.PDF](http://rheinisches-revier.de/fileadmin/user_upload/pdf/allgemein/161129_innovationsregion_rheinisches_revier_sachstand_projektqualifizierung_herbst_2016_WEB.PDF) (16.06.2017).

IRR (Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien) (2017): EU-Umweltminister wollen Emissionshandel modernisieren. Münster: IWR. <http://www.iwr.de/news.php?id=33188> (10.04.2017).

Jendritzky, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): *Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, S. 108–118.

Kang, C.-M., Gupta, T., Ruiz, P. A., Wolfson, J. M., Ferguson, S. T., Lawrence, J. E., Rohr, A. C., Godleski, J., Koutrakis, P. (2011): Aged particles derived from emissions of coal-fired power plants: the TERESA field results. *Inhalation Toxicology* 23 (Suppl. 2), S. 11–30.

Kehe, K., Eyer, P. (2013): Gasförmige Verbindungen. In: Marquardt, H., Schäfer, S. G., Barth, H. (Hrsg.): *Lehrbuch der Toxikologie*. 3. Aufl. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, S. 855–884.

Klaus, T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., Müschen, K. (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Kluge, J., Lehmann, R., Ragnitz, J., Rösel, F. (2014): Industrie- und Wirtschaftsregion Lausitz: Bestandsaufnahme und Perspektiven. Dresden ifo Institut. ifo Dresden Studien 71.

Köhl, M., Plugge, D., Gutsch, M., Lasch-Born, P., Müller, M., Reyer, C. (2017): Wald und Forstwirtschaft. In: Bresseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 193–201.

Koppe, C., Jendritzky, G., Pfaff, G. (2004): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. In: DWD (Deutscher Wetterdienst) (Hrsg.): *Klimastatusbericht 2003*. Offenbach am Main: DWD, S. 152–162.

Kraft, M., Eikmann, T., Kappos, A., Künzli, N., Rapp, R., Schneider, K., Seitz, H., Voss, J.-U., Wichmann, H. E. (2005): The German view: Effects of nitrogen dioxide on human health – derivation of health-related short-term and long-term values. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 208 (4), S. 305–318.

Kunz, C., Maier, M. (2017): *Zusammenspiel von Strom und Wärmesystem*. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien. Metaanalyse.

Kunz, M., Mohr, S., Werner, P. (2017): Niederschlag. In: Bresseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 57–66.

- Kutzner, F. (2014): Analyse des Forschungs- und Konzeptstandes zur zukünftigen Entwicklung der Lausitz mit und ohne Braunkohleausstiegspfad. Kurzstudie für die Fraktion DIE LINKE im sächsischen Landtag. Dresden: SVU Dresden.
- LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) (2012): Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz. Langfassung. München: LAI.
- Lange, H. R., Krüger, W. (2017): Das Lausitz-Papier. Cottbus: Innovationsregion Lausitz, Industrie- und Handelskammer Cottbus. <https://www.cottbus.ihk.de/blob/cbihk24/servicemarken/presse/Aktuelle-Meldungen/3619676/ccdf4de2e424c7731b8615fa9dee0ee4/2017-01-19-LAUSITZ-PAPIER-data.pdf> (22.06.2017).
- LANUV NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2010): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid im Zusammenhang mit der Luftreinhalteplanung. Recklinghausen: LANUV NRW.
- Larsen, J. (2006): Plan B Updates. Setting the Record Straight: More than 52.000 Europeans Died from Heat in Summer 2003. Stand: 28.07.2006. Washington, DC: Earth Policy Institute. [http://www.earth-policy.org/plan\\_b\\_updates/2006/update56](http://www.earth-policy.org/plan_b_updates/2006/update56) (12.07.2017).
- Lausitzer Rundschau (20.03.2017): Leag fährt Ausbildung zurück. <http://www.lr-online.de/regionen/cottbus/Leag-faehrt-Ausbildung-zurueck;art1049,5911062> (14.06.2017).
- Lavigne, E., Yasseen, A. S., Stieb, D. M., Hystad, P., Donkelaar, A. van, Martin, R. V., Brook, J. R., Crouse, D. L., Burnett, R. T., Chen, H., Weichenthal, S., Johnson, M., Villeneuve, P. J., Walker, M. (2016): Ambient air pollution and adverse birth outcomes: Differences by maternal comorbidities. *Environmental Research* 148, S. 457–466.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser), LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz), LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2016): Bericht zum Kenntnis- und Diskussionsstand betreffend Quecksilberbelastungen in Gewässern und diesbezügliche Relevanz luftbürtiger Quellen. 2. Bericht der Ad-hoc-AG LAWA, LAI, LABO betreffend Hg-Belastungen. o. O.: LAWA, LAI, LABO.
- Lehr, U., Ulrich, P., Lutz, C., Thobe, I., Edler, D., O'Sullivan, M., Simon, S., Naegler, T., Pfenning, U., Peter, F., Sakowski, F., Bickel, P. (2015): Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland: Ausbau und Betrieb, heute und morgen. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Politikberatung kompakt 101. [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.510565.de/diwkompakt\\_2015-101.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.510565.de/diwkompakt_2015-101.pdf) (05.09.2017).
- Le Quéré, C. (2016): Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data* 8, S. 605–649.
- Levermann, A., Bamber, J. L., Drijfhout, S., Ganopolski, A., Haeberli, W., Harris, N. R. P., Huss, M., Krüger, K., Lenton, T. M., Lindsay, R. W., Notz, D., Wadhams, P., Weber, S. (2012): Potential climatic transitions with profound impact on Europe. *Climatic Change* 110 (3), S. 845–878.
- Levermann, A., Griesel, A., Hofmann, M., Montoya, M., Rahmstorf, S. (2005): Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 24 (4), S. 347–354.
- Lipfert, F. W. (2017): Long-Term Associations of Morbidity with Air Pollution: A Catalogue and Synthesis. *Journal of the Air & Waste Management Association*. First published online. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28679072>.
- Liu, W., Xie, S.-P., Liu, Z., Zhu, J. (2017): Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. *Science Advances* 3 (1), e1601666. <http://advances.sciencemag.org/content/3/1/e1601666> (10.04.2017).
- LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft) (2017): Einblicke. Sanierung, Sicherung und Rekultivierung von Bergwerken und Tagebauen. Senftenberg: LMBV.
- Lorenz, C. (2017): Balancing Reserves within a Decarbonized European Electricity System in 2050 – From Market Developments to Model Insights. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. DIW Discussion Papers 1656.
- Lorenz, C., Gerbaulet, C. (2017): Wind Providing Balancing Reserves – An Application to the German Electricity System of 2025. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. DIW Discussion Papers 1655.
- Markwardt, G., Mißler-Behr, M., Schuster, H., Zundel, S., Hedderoth, J. (2016): Strukturwandel in der Lausitz. Wissenschaftliche Auswertung der Potentialanalysen der Wirtschaft der Lausitz ab 2010. Dresden, Cottbus: Technische Universität, BTU Cottbus-Senftenberg.
- Matthes, F. C. (2017): Sind komplementäre Maßnahmen zum EU ETS wirklich nur Nullsummenspiele? Vortrag, Workshop des Öko-Instituts auf den Berliner Energietagen 2017 „Neues vom Emissionshandel“, 05.05.2017, Berlin.
- Matthes, F. C., Emele, L., Hermann, H., Loreck, C., Peter, F., Ziegenhagen, I., Cook, V. (2017): Zukunft Stromsystem. Kohleausstieg 2035. Vom Ziel her denken. Berlin: WWF Deutschland.

- Mayntz, R., Scharpf, F. W. (Hrsg.) (1995): Gesellschaftliche Selbstregulierung und politische Steuerung. Frankfurt am Main: Campus.
- Mengel, M., Levermann, A., Frieler, K., Robinson, A., Marzeion, B., Winkelmann, R. (2016): Future sea-level rise constrained by observations and long-term commitment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (10), S. 2597–2602.
- Narberhaus, I., Krause, J., Bernitt, U. (Hrsg.) (2012): Bedrohte Biodiversität in der deutschen Nord- und Ostsee. Empfindlichkeiten gegenüber anthropogenen Nutzungen und den Effekten des Klimawandels. Bonn-Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 116.
- Neas, L. M., Dockery, D. W., Ware, J. H., Spengler, J. D., Speizer, F. E., Ferris, B. G. (1991): Association of indoor nitrogen dioxide with respiratory symptoms and pulmonary function in children. *American Journal of Epidemiology* 134 (2), S. 204–219.
- Neuhoff, K., Acworth, W., Dechezleprêtre, A., Sartor, O., Sato, M., Schopp, A. (2014): Energie- und Klimapolitik: Europa ist nicht allein. *DIW Wochenbericht* 81 (6), S. 91–108.
- Nitsch, J. (2013): „Szenario 2013“ – eine Weiterentwicklung des Leitszenarios 2011. (Eckdaten und Kurzbeschreibung). Stuttgart: Nitsch. [https://www.neueenergie.net/sites/default/files/medien/u234/dateien/130413\\_szenario-2013\\_nitsch.pdf](https://www.neueenergie.net/sites/default/files/medien/u234/dateien/130413_szenario-2013_nitsch.pdf) (12.07.2017).
- O'Neill, B. C., Oppenheimer, M., Warren, R., Stephane Hallegatte, Kopp, R. E., Pörtner, H. O., Scholes, R., Birkmann, J., Foden, W., Licker, R., Mach, K. J., Marbaix, P., Mastrandrea, M. D., Price, J., Takahashi, K., Ypersele, J.-P. van, Yohe, G. (2017): IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change* 7 (1), S. 28–37.
- Oei, P.-Y. (2016): Politische Optionen für Klimaschutz und Kohleausstieg. Berlin: Heinrich Böll Stiftung. böll.brief – Grüne Ordnungspolitik 3.
- Oei, P.-Y., Brauers, H., Kemfert, C., Hirschhausen, C. von, Schäfer, D., Schmalz, S. (2017): Klimaschutz und Betreiberwechsel: Die ostdeutsche Braunkohlewirtschaft im Wandel. *DIW Wochenbericht* 84 (6–7), S. 103–113.
- Oei, P.-Y., Gerbaulet, C., Kemfert, C., Kunz, F., Hirschhausen, C. von (2016): „Kohlereserve“ vs. CO<sub>2</sub>-Grenzwerte in der Stromwirtschaft – Ein modellbasierter Vergleich. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 66 (1–2), S. 57–60.
- Oei, P.-Y., Gerbaulet, C., Kemfert, C., Kunz, F., Hirschhausen, C. von (2015a): Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für fossile Kraftwerke auf Strommarkt und Klimaschutz in Deutschland. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *Politikberatung kompakt* 104. [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.521081.de/diwkompakt\\_2015-104.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.521081.de/diwkompakt_2015-104.pdf) (16.06.2017).
- Oei, P.-Y., Gerbaulet, C., Kemfert, C., Kunz, F., Reitz, F., Hirschhausen, C. von (2015b): Effektive CO<sub>2</sub>-Minderung im Stromsektor: Klima-, Preis- und Beschäftigungseffekte des Klimabeitrags und alternativer Instrumente. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *Politikberatung kompakt* 98. [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.509387.de/diwkompakt\\_2015-098.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.509387.de/diwkompakt_2015-098.pdf) (16.06.2017).
- Oei, P.-Y., Kemfert, C., Reitz, F., Hirschhausen, C. von (2014): Braunkohleausstieg – Gestaltungsoptionen im Rahmen der Energiewende. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. *Politikberatung kompakt* 84. [http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.471589.de/diwkompakt\\_2014-084.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.471589.de/diwkompakt_2014-084.pdf) (06.03.2015).
- Oei, P.-Y., Mendelevitch, R. (2016): Perspectives on Colombian Coal Exports on the International Steam Coal Market until 2030. This study was carried out on behalf of the Rosa-Luxemburg-Stiftung. Berlin: Rosa-Luxemburg-Stiftung. [https://www.rosalux.de/fileadmin/rls\\_uploads/pdfs/engl/Onlinestudie\\_Kohle\\_en.pdf](https://www.rosalux.de/fileadmin/rls_uploads/pdfs/engl/Onlinestudie_Kohle_en.pdf) (05.09.2017).
- Öko-Institut (2017): Die deutsche Braunkohlenwirtschaft. Historische Entwicklungen, Ressourcen, Technik, wirtschaftliche Strukturen und Umweltauswirkungen. Studie im Auftrag von Agora Energiewende und der European Climate Foundation. Berlin: Agora Energiewende.
- Öko-Institut, Fraunhofer ISI (Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Berlin, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI. <http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> (27.09.2016).
- Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2014): Klimaschutzszenario 2050. 1. Modellierungsrunde. Berlin, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI.
- Oosterlee, A., Drijver, M., Lebret, E., Brunekreef, B. (1996): Chronic respiratory symptoms in children and adults living along streets with high traffic density. *Occupational and Environmental Medicine* 53 (4), S. 241–247.
- Opielka, M., Evers-Wölk, M., Nolte, R., Göll, E., Kamburow, C. (2014): Erfolgreiche regionale Transformationsprozesse. Mögliche Zukünfte für die Region Ruhr. Kurzstudie im Auftrag der Brost-Stiftung, Essen. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. IZT-Text 1-2014.

- Ostberg, S., Lucht, W., Schaphoff, S., Gerten, D. (2013): Critical impacts of global warming on land ecosystems. *Earth System Dynamics Discussions* 4 (2), S. 347–357. <http://www.earth-syst-dynam.net/4/347/2013/esd-4-347-2013.pdf> (23.06.2017).
- Oster, F., Erdmann, G. (2017): Die verborgenen Kosten der Vorhaltung von Kraftwerksleistung. *Energiwirtschaftliche Tagesfragen* 67 (4), S. 26–29.
- Ostro, B. (2004): Outdoor air pollution. Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Geneva: World Health Organization. *Environmental burden of disease series* 5.
- Oudin Åström, D., Schifano, P., Asta, F., Lallo, A., Michelozzi, P., Rocklöv, J., Forsberg, B. (2015): The effect of heat waves on mortality in susceptible groups: a cohort study of a mediterranean and a northern European City. *Environmental Health* 14. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4397690/> (12.07.2017).
- Pershagen, G., Rylander, E., Norberg, S., Eriksson, M., Nordvall, S. L. (1995): Air pollution involving nitrogen dioxide exposure and wheezing bronchitis in children. *International Journal of Epidemiology* 24 (6), S. 1147–1153.
- Pescia, D., Redl, C. (2014): Comparing electricity prices for industry. An elusive task – illustrated by the German Case. Berlin: Agora Energiewende. 036/02-A-2014/EN.
- Peters, A., Heinrich, J., Wichmann, H.-E. (2002): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Kurzeffekte. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 7 (2), S. 101–115.
- Pfeiffer, E.-M., Eschenbach, A., Munch, J. C. (2017): Boden. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 203–214.
- Pietroni, A., Fernahl, A., Linkenheil, C. P., Niggemaier, M., Huneke, F. (2017): Klimaschutz durch Kohleausstieg. Wie ein Ausstieg aus der Kohle Deutschlands Klimaziele erreichbar macht, ohne die Versorgungssicherheit zu gefährden. Hamburg: Greenpeace.
- Pläß, D., Conrad, A. (2017): Gesundheitliche Auswirkungen von Maßnahmen und Technologien der Energiewende. *Umweltmedizin – Hygiene – Arbeitsmedizin* 22 (2), S. 71–80.
- Preiss, P., Roos, J., Friedrich, R. (2013): Assessment of Health Impacts of Coal Fired Power Stations in Germany. By Applying EcoSenseWeb. Stuttgart: Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy.
- Prognos AG (2013): *Prognos Zukunftsatlas 2013 – Deutschlands Regionen im Zukunftswettbewerb*. Berlin, Bremen, Düsseldorf: Prognos AG. [https://www.prognos.com/fileadmin/pdf/Atlanten/ZKA\\_2013\\_Regionen/Zukunftsatlas\\_2013\\_Auf\\_einen\\_Blick.pdf](https://www.prognos.com/fileadmin/pdf/Atlanten/ZKA_2013_Regionen/Zukunftsatlas_2013_Auf_einen_Blick.pdf) (14.06.2017).
- Putnam, R. D. (1988): *Diplomacy and Domestic Politics: The Logic of Two-Level Games* International Organization 42 (3), S. 427–460.
- r2b energy consulting, HWWI (Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut) (2014): *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020: Konsequenzen potenzieller Kraftwerksstilllegungen*. Köln, Hamburg: r2b energy consulting, HWWI. [http://www.bdi.eu/download\\_content/EnergieUndRohstoffe/2014\\_11\\_19\\_r2b\\_HWWI\\_Gutachten\\_BDI\\_Klimaschutz.pdf](http://www.bdi.eu/download_content/EnergieUndRohstoffe/2014_11_19_r2b_HWWI_Gutachten_BDI_Klimaschutz.pdf) (02.03.2015).
- Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z. J., Beelen, R., Samoli, E., Stafoggia, M., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M. J., Brunekreef, B., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Sommar, J., Forsberg, B., Modig, L., Oudin, A., Oftedal, B., Schwarze, P. E., Nafstad, P., De Faire, U., Pedersen, N. L., Ostenson, C. G., Fratiglioni, L., Penell, J., Korek, M., Pershagen, G., Eriksen, K. T., Sorensen, M., Tjonneland, A., Ellermann, T., Eeftens, M., Peeters, P. H., Meliefste, K., Wang, M., Bueno-de-Mesquita, B., Key, T. J., Hoogh, K. de, Concin, H., Nagel, G., Vilier, A., Grioni, S., Krogh, V., Tsai, M. Y., Ricceri, F., Sacerdote, C., Galassi, C., Migliore, E., Ranzi, A., Cesaroni, G., Badaloni, C., Forastiere, F., Tamayo, I., Amiano, P., Dorronsoro, M., Trichopoulos, A., Bamia, C., Vineis, P., Hoek, G. (2013): Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Lancet, Oncology* 14 (9), S. 813–822.
- Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., Schaffernicht, E. J. (2015): Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change* 5 (5), S. 475–448.
- Regionomica (2013): *Potentialanalyse zur intelligenten Spezialisierung in der Innovationsregion Rheinisches Revier (IRR)*. Berlin: Regionomica.
- Robine, J. M., Cheung, S. L., Roy, S. L., Oyen, H. V., Herrmann, F. R. (2007): Report on excess mortality in Europe during summer 2003. (EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114). Brüssel: Europäische Kommission.
- Rogelj, J., Schaeffer, M., Friedlingstein, P., Gillett, N. P., Vuuren, D. P. van, Riahi, K., Allen, M., Knutti, R. (2016): Differences between carbon budget estimates unravelled. *Nature Climate Change* 6 (3), S. 245–252.

- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J. W. (2014): Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (9), S. 3268–3273.
- Salomon, M. (2009): Quecksilber – weiterhin eine Herausforderung im Stoffrisikomanagement. SRU nimmt Stellung zur Europäischen Quecksilberstrategie. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 14 (2), S. 110.
- Schaap, M., Wichink Kruit, R., Hendriks, C., Kranenburg, R., Segers, A., Bultjes, P., Banzhaf, S., Scheuschner, T. (2014): Ermittlung und Bewertung der Einträge von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen in terrestrische Ökosysteme in 2009. FKZ 3712 63 240 1. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Schaible, C. (2017): Kohlekraftwerke bald weniger schmutzig. *umwelt aktuell* 2017 (6), S. 6–7.
- Scheuermann, A., Erfurt, I., Peters, W., Schicketanz, S. (2012): Regionales Energie- und Klimaschutzkonzept für die Planungsregion Oberlausitz-Niederschlesien. Bericht. Kurzfassung. Leipzig, Berlin: Leipziger Institut für Energie, Bosch & Partner.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B. M., Colón-González, F. J., Gosling, S. N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F. T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wadar, Y., Wissers, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., Kabat, P. (2014): Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (9), S. 3245–3250.
- Schill, W.-P., Gerbaulet, C. (2015): Power system impacts of electric vehicles in Germany: Charging with coal or renewables? *Applied Energy* 156, S. 185–196.
- Schucht, S. (1998): Ökologische Modernisierung und Strukturwandel in der deutschen Stahlindustrie. Berlin: Forschungsstelle für Umweltpolitik. FFU-Report 99-3. <http://userpage.fu-berlin.de/~ffu/download/rep-99-3.PDF> (02.03.2015).
- Schücking, H. (2013): Banking on coal. Sassenberg, Nijmegen, Praha, Kraków: urgewald, BankTrack, CEE Bankwatch Network, Polska Zielona Sieć. [https://www.banktrack.org/download/banking\\_on\\_coal/banking\\_on\\_coal\\_updated.pdf](https://www.banktrack.org/download/banking_on_coal/banking_on_coal_updated.pdf) (05.09.2017).
- Schulz, S., Schwartzkopff, J. (2016): Erfahrungen mit dem Strukturwandel. Instrumentarium für einen sozialverträglichen Kohleausstieg. London: E3G. [https://www.e3g.org/docs/Experiences\\_with\\_structural\\_change\\_DE.pdf](https://www.e3g.org/docs/Experiences_with_structural_change_DE.pdf) (16.06.2017).
- Schwartzkopff, J., Schulz, S. (2015): Zukunftsperspektiven für die Lausitz. Was kommt nach der Kohle? London: E3G. [https://www.e3g.org/docs/E3G\\_Zukunftsperspektiven\\_Lausitz.pdf](https://www.e3g.org/docs/E3G_Zukunftsperspektiven_Lausitz.pdf) (16.06.2017).
- Schwarzkopff, F., Drescher, J., Gornig, M., Blazejczak, J. (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Berlin: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden. [http://win-ev.org/fileadmin/win-ev.org/Verband/Studie\\_bbs\\_Sekund%C3%A4rrohstoffe\\_2016.pdf](http://win-ev.org/fileadmin/win-ev.org/Verband/Studie_bbs_Sekund%C3%A4rrohstoffe_2016.pdf) (16.06.2017).
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2013): Luftreinhalteplan 2011 bis 2017 für Berlin. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2016): Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2015a): 10 Thesen zur Zukunft der Kohle bis 2040. Berlin: SRU. Kommentar zur Umweltpolitik 14.
- SRU (2015b): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2012): Umweltgutachten 2012. Verantwortung in einer begrenzten Welt. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2009): Abscheidung, Transport und Speicherung von Kohlendioxid: Der Gesetzentwurf der Bundesregierung im Kontext der Energiedebatte. Berlin: SRU. Stellungnahme 13.
- SRU (2008): Umweltgutachten 2008. Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. Berlin: Erich Schmidt.
- SRU (2002): Umweltgutachten 2002. Für eine neue Vorreiterrolle. Stuttgart: Metzler-Poeschel.
- SRU (2000): Umweltgutachten 2000. Schritte ins nächste Jahrtausend. Stuttgart: Metzler-Poeschel.
- Statistik der Kohlenwirtschaft (2017): Zur Lage des Kohlenbergbaus in der Bundesrepublik Deutschland. Jahr 2016. Herne, Köln: Statistik der Kohlenwirtschaft. [www.kohlenstatistik.de/files/lb\\_statistik\\_2016\\_1.pdf](http://www.kohlenstatistik.de/files/lb_statistik_2016_1.pdf) (10.04.2017).
- Statistik der Kohlenwirtschaft (2016): Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2015. Herne, Köln: Statistik der Kohlenwirtschaft.

[http://www.kohlenstatistik.de/files/silberbuch\\_2015.pdf](http://www.kohlenstatistik.de/files/silberbuch_2015.pdf) (10.04.2017).

Syversen, T., Kaur, P. (2014): Die Toxikologie des Quecksilbers und seiner Verbindungen. *Perspectives in Medicine* 2 (1–4), S. 133–150.

Töller, A. E. (2012): Warum kooperiert der Staat. Kooperative Umweltpolitik im Schatten der Hierarchie. Baden-Baden: Nomos. Staatslehre und politische Verwaltung 15.

Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. *Climate Change* 10/2012. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4298.pdf> (12.07.2017).

Tunnicliffe, W. S., Burge, P. S., Ayres, J. G. (1994): Effect of domestic concentrations of nitrogen dioxide on airway responses to inhaled allergen in asthmatic patients. *The Lancet* 344 (8939), S. 1733–1736.

UBA (Umweltbundesamt) (2017a): Daten. Energiebereitstellung und -verbrauch. Energiebedingte Emissionen. Energiebedingte Emissionen durch Stromerzeugung. Stand: 24.05.2017. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energiebedingte-emissionen#textpart-3> (30.07.2017).

UBA (2017b): Daten. Gewässerbelastung. Fließgewässer. Einträge von Nähr- und Schadstoffen in die Oberflächengewässer. Stand: 24.02.2017. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/gewaesserbelastung/fliessgewaesser/eintraege-von-naehr-schadstoffen-in-die#textpart-1> (23.06.2017).

UBA (2017c): Daten. Klimawandel. Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Stand: 20.03.2017. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1> (22.06.2017).

UBA (2017d): Daten. Luftbelastung. Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Schwermetall-Emissionen. Stand: 12.06.2017. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/schwermetall-emissionen#textpart-1> (01.08.2017).

UBA (2017e): German Informative Inventory Report. 1.A.1.a – Public Electricity and Heat Production Stand: 04.01.2017. Dessau-Roßlau: UBA. <http://iir-de.wikidot.com/1-a-1-a-public-electricity-and-heat-production> (10.04.2017).

UBA (2017f): Kompatibilität des Europäischen Emissionshandels mit interagierenden energie- und klimapolitischen Instrumenten und Maßnahmen. Marktknappheit durch

stringente Zielbestimmung und flexible Steuerung des Zertifikate-Angebots. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Positionspapier. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/positionspapier\\_kompatibilitat\\_eu-ets.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/positionspapier_kompatibilitat_eu-ets.pdf) (30.07.2017).

UBA (2017g): Luftqualität 2016. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau: UBA. Hintergrund.

UBA (2016a): Daten. Luftbelastung. Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Stand: 12.06.2017. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland> (10.04.2017).

UBA (2016b): Klimaschutz im deutschen Kraftwerkspark. Dessau-Roßlau: UBA. UBA-Position. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutz\\_im\\_deutschen\\_kraftwerkspark.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutz_im_deutschen_kraftwerkspark.pdf) (30.07.2017).

UBA (2016c): Themen. Gesundheit. Umwelteinflüsse auf den Menschen. Chemische Stoffe. Quecksilber. Häufige Fragen zu Quecksilber. Stand: 04.05.2016. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/haeufige-fragen-zu-quecksilber#textpart-1> (10.04.2017).

UBA (2015a): Klimabeitrag für Kohlekraftwerke. Wie wirkt er auf Stromerzeugung, Arbeitsplätze und Umwelt? Position. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2015b): Luftqualität 2014. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau: UBA.

UBA (2013): Themen. Luft. Luftschadstoffe im Überblick. Schwefeldioxid. Stand: 03.09.2013. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/schwefeldioxid> (23.06.2017).

UNEP (United Nations Environmental Programme) (2008): *The Global Atmospheric Mercury Assessment: Sources, Emissions and Transport*. Geneva: UNEP, Chemicals Branch.

Vallentin, D., Wehnert, T., Schüle, R., Mölter, H. (2016): Strategische Ansätze für die Gestaltung des Strukturwandels in der Lausitz. Was lässt sich aus den Erfahrungen in Nordrhein-Westfalen und dem Rheinischen Revier lernen? Endbericht. Im Auftrag von Bündnis 90/Die Grünen im Brandenburger Landtag. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

VGB Powertech (2017): Produktion und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten aus Kohlekraftwerken in Deutschland im Jahr 2014. Essen: VGB Powertech. [https://www.vgb.org/vgbmultimedia/statistiktafel\\_kraftwerksnebenprodukten2014.pdf](https://www.vgb.org/vgbmultimedia/statistiktafel_kraftwerksnebenprodukten2014.pdf) (24.07.2017).

- Der Westen (12.09.2016): Energiekonzern Steag will bis zu 1000 Arbeitsplätze abbauen. <http://www.derwesten.de/wirtschaft/energiekonzern-steag-will-bis-zu-1000-arbeitsplaetze-abbauen-id12184477.html> (10.04.2017).
- Der Westen (25.10.2015): Braunkohle-Kompromiss kostet bei RWE bis zu 1000 Stellen. <http://www.derwesten.de/wirtschaft/braunkohle-kompromiss-kostet-bei-rwe-bis-zu-1000-stellen-id11217555.html> (10.04.2017).
- WHO (World Health Organization – Regional Office for Europe) (2013): Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP. Technical report. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf) (24.03.2014).
- WHO (2000): Air quality guidelines for Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. WHO Regional Publications, European Series 91.
- Wolff, W. J., Bakker, J. P., Laursen, K., Reise, K. (2010): The Wadden Sea Quality Status Report – Synthesis Report 2010. Wilhelmshaven: Common Wadden Sea Secretariat. Wadden Sea Ecosystem 29. <http://www.waddensea-secretariat.org/node/76> (13.09.2013).
- World Bank (2013): Turn the Heat Down. Climate Extremes, Regional Impacts, and the Case for Resilience. A report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics. Washington, DC: The World Bank.
- Wörten, C., Keppler, L., Holzhausen, G. (2017): Arbeitsplätze in Braunkohleregionen – Entwicklungen in der Lausitz, dem Mitteldeutschen und Rheinischen Revier. Kurzstudie. Berlin: Arepo Consult.
- Wronski, R., Fiedler, S., Gaßner, H., Viezens, L. (2017): Finanzierung der Braunkohle-Folgekosten in Nordrhein-Westfalen. RWE-Umstrukturierung erhöht Risiken für die Deckung der Braunkohlerückstellungen. Berlin: Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, Gaßner, Groth, Siederer & Coll.
- Wronski, R., Fiedler, S., Schäuble, D., Setton, D. (2016): Finanzielle Vorsorge im Braunkohlebereich. Optionen zur Sicherung der Braunkohlerückstellungen und zur Umsetzung des Verursacherprinzips. Berlin, Potsdam: Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, Institute for Advanced Sustainability Studies. Studien 6/2016.
- Wu, Y. C., Lin, Y. C., Yu, H. L., Chen, J. H., Chen, T. F., Sun, Y., Wen, L. L., Yip, P. K., Chu, Y. M., Chen, Y. C. (2015): Association between air pollutants and dementia risk in the elderly. *Alzheimer's & Dementia* 1 (2), S. 220–228.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung), Öko-Institut, Fraunhofer ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung), Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, IFOK (Institut für Organisationskommunikation) (2016): Maßnahmenkatalog. Ergebnis des Dialogprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. <http://www.klimaschutzplan2050.de/wp-content/uploads/2015/09/Massnahmenkatalog-3-1-final-Ergaenzungen-Anpassungen1.pdf> (27.09.2016).
- Xu, Z., Hu, W., Su, H., Turner, L. R., Ye, X., Wang, J., Tong, S. (2014a): Extreme temperatures and paediatric emergency department admissions. *Journal of Epidemiology and Community Health* 68, S. 304–311.
- Xu, Z., Sheffield, P. E., Su, H., Wang, X., Bi, Y., Ton, S. (2014b): The impact of heat waves on children's health: a systematic review. *International Journal of Biometeorology* 58 (2), S. 239–247.
- Ziehm, C. (2014): Wie lässt sich der Kohleausstieg einleiten? Neue rechtliche Vorgaben für Bau und Betrieb von Kohlekraftwerken. Gutachten im Auftrag von Bündnis 90/Die Grünen Bundestagsfraktion vom April 2014. Berlin: Bündnis 90/Die Grünen, Bundestagsfraktion.
- Ziehm, C., Kemfert, C., Oei, P.-Y., Reitz, F., Hirschhausen, C. von (2014): Entwurf und Erläuterung für ein Gesetz zur Festsetzung nationaler CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards für fossile Kraftwerke in Deutschland. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Politikberatung kompakt 82. [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.467555.de/diwkompakt\\_2014-082.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.467555.de/diwkompakt_2014-082.pdf) (16.06.2017).





**Sachverständigenrat  
für Umweltfragen**

Luisenstraße 46  
10117 Berlin  
+49 30 263696-0  
info@umweltrat.de  
www.umweltrat.de

Die Veröffentlichungen des SRU sind auf der Homepage  
verfügbar und können über die Geschäftsstelle kostenfrei  
bestellt werden.

ISBN 978-3-947370-10-8