

Oei, Pao-Yu; Göke, Leonard; Kemfert, Claudia; Kendzioriski, Mario; von Hirschhausen, Christian R.

Research Report

Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor

DIW Berlin: Politikberatung kompakt, No. 133

Provided in Cooperation with:

German Institute for Economic Research (DIW Berlin)

Suggested Citation: Oei, Pao-Yu; Göke, Leonard; Kemfert, Claudia; Kendzioriski, Mario; von Hirschhausen, Christian R. (2019) : Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor, DIW Berlin: Politikberatung kompakt, No. 133, ISBN 978-3-946417-25-5, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/201572>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

133

Politikberatung kompakt

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

2019

Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor

Pao-Yu Oei, Leonard Göke, Claudia Kemfert, Mario Kendzioriski und Christian von Hirschhausen

IMPRESSUM

© DIW Berlin, 2019

DIW Berlin
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
Mohrenstraße 58
10117 Berlin
Tel. +49 (30) 897 89-0
Fax +49 (30) 897 89-200
www.diw.de

ISBN 978-3-946417-25-5
ISSN 1614-6921

Alle Rechte vorbehalten.
Abdruck oder vergleichbare
Verwendung von Arbeiten
des DIW Berlin ist auch in
Auszügen nur mit vorheriger
schriftlicher Genehmigung
gestattet.

DIW Berlin: Politikberatung kompakt 133

Pao-Yu Oei^{1,2,3,*}

Leonard Göke^{1,2}

Claudia Kemfert^{1,2,4}

Mario Kendziorowski^{1,2}

Christian von Hirschhausen^{1,2}

Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor

Studie im Auftrag der
Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen



Berlin, Februar 2019

(*) DIW Berlin, Abteilung Energie, Verkehr und Umwelt (EVU) Mohrenstr. 58, 10117 Berlin, poei@diw.de

¹ DIW Berlin, Abteilung Energie, Verkehr und Umwelt (EVU), Mohrenstr. 58, 10117 Berlin

² TU Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP), Str. des 17. Juni 135, 10623 Berlin

³ CoalExit Forschungsgruppe, Str. des 17. Juni 135, 10623 Berlin

⁴ Hertie School of Governance, Friedrichstraße 180, 10117 Berlin

Das Wichtigste auf einer Seite

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein entscheidender Bestandteil bei der Erzielung nationaler, europäischer und internationaler Klimaschutzziele; dies gilt insbesondere für den Stromsektor, in dem eine bis zu 100%-ige Versorgung mit Erneuerbaren sicher und kostengünstig erreicht werden kann. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt bis zum Jahr 2020 den Ausstoß von Treibhausgasen gegenüber 1990 um 40% zu reduzieren; bis 2050 sollen die Emissionen sowohl in Deutschland als auch in der gesamten Europäischen Union sogar um mindestens 80-95% sinken. Die gegenwärtig geplanten und die von der Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung verabschiedeten politischen Instrumente sind allerdings nicht ausreichend, um die deutschen Klimaschutzziele für 2020 als auch für 2030 einzuhalten. Die vorliegende Studie untersucht daher die Auswirkungen eines verstärkten Ausbaus erneuerbarer Energien im Stromsektor in Verbindung mit einem Kohleausstieg bis 2030; durch diese Maßnahmen soll u.a. die dauerhafte Verfehlung der Klimaschutzziele verhindert werden.

Mit den aktuell im EEG festgelegten Ausbaukorridoren wird im Jahr 2030 ein Anteil von ca. 55% in der Stromerzeugung erreicht. Der gegenwärtige Koalitionsvertrag sieht eine Anhebung des Erneuerbarenziels für 2030 auf 65% vor. Um dieses Ziel zu erreichen bedarf es einer Anpassung des jährlichen Bruttozubaues auf 4,4 GW für Photovoltaik und auf 4,3 GW für Wind Onshore. Bei einer weiteren Steigerung der Ausbauraten sowie einem Anstieg von Wind Offshore von geplanten 15 GW auf 20-35 GW kann der Anteil der Erneuerbaren bis 2030 auch auf 85% - 100% gesteigert werden. Dadurch würde ein wichtiger Beitrag zur Einhaltung der deutschen und europäischen Klimaschutzziele erreicht und international ein Zeichen für eine Energiewende mit Erneuerbaren gesetzt. Des Weiteren ist der Stromsektor in der Lage, die abzusehende Zielverfehlung anderer Sektoren zu kompensieren, was ökonomisch und umweltpolitisch effizient ist.

Zur Analyse von Klimaschutzmaßnahmen im Stromsektor werden in dieser Studie ein Investitionsmodell und ein Kraftwerkseinsatzmodell verwendet, um den kostenminimalen Kraftwerkspark in Deutschland und Europa bis 2030 bzw. 2050 zu ermitteln. Dabei werden fünf unterschiedliche Szenarien untersucht, welche unterschiedliche Zeithorizonte für den Kohle-

ausstieg (2038 und 2030) und unterschiedliche Anteile Erneuerbarer am Stromverbrauch (55%, 65%, 85%, 100%) berücksichtigen.

Die Modellergebnisse zeigen, dass der Ausbau erneuerbarer Energien eine effiziente Ergänzung zu einem beschleunigten Kohleausstieg darstellt, und auch eine Vollversorgung mit Erneuerbaren (100%) im Stromsektor möglich ist. Bei einer Abschaltung der Kohlekraftwerke bis 2030 wird dessen Kapazität in den 85%- bzw. 100%-Erneuerbaren-Szenarien überwiegend durch Gaskraftwerke mit synthetischem Gas (Power-to-Gas Anlagen) ersetzt, zu einem geringen Teil auch durch Erdgaskraftwerke bzw. Geothermie. Im Szenario Kohle- und Erdgasausstieg kann eine sichere Stromversorgung durch die vertiefte Integration in das europäische Stromnetz sowie die verstärkte Nutzung von Speichern gewährleistet werden.

Der Zubau von Erneuerbaren wirkt sich dämpfend auf die Börsenstrompreise aus, dagegen führt die Verwendung von Erdgas aufgrund relativ hoher Rohstoffpreise (18-30 €/MWh) zu steigenden Strompreisen. Auch die CO₂-Zertifikate werden im Lauf der Klimaschutzmaßnahmen teurer (40-60 €/t CO₂) und schlagen auf den Strompreis durch. Insgesamt ist für 2030 mit leicht steigenden Börsenstrompreisen zu rechnen; diese sind umso geringer, je höher der Anteil der Erneuerbaren ist. Da der resultierende Börsenstrompreis im „85% ohne Kohle“ Szenario in der gleichen Größenordnung wie im letzten Jahrzehnt liegt, sind nur sehr begrenzte Auswirkungen für die energieintensive Industrie zu erwarten.

Die Modellergebnisse zeigen, dass durch einen verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien sowie einen Kohleausstieg bis 2030, dringend benötigte Klimaschutzmaßnahmen getroffen werden können. Eine Kombination aus der Investition in erneuerbare Energien sowie Nachfragereduktion (Effizienzverbesserung und Verhaltensanpassungen) und –management (Stromspeicher, Demand-Side-Management) können darüber hinaus zur Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit der Stromversorgung beitragen. Um neben der deutschen Energiewende auch die internationale Ebene einzubeziehen sollte sich Deutschland zudem auch wieder verstärkter für die Umsetzung der Dekarbonisierung Europas und die Einhaltung der globalen Pariser Klimaschutzziele einsetzen.

Inhaltsverzeichnis

Das Wichtigste auf einer Seite.....	I
Inhaltsverzeichnis	III
1. Ziele der deutschen Energiepolitik und ihre Umsetzung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Ausbau erneuerbarer Energien.....	2
2. Szenarien und Methodik.....	4
2.1. Fortsetzung der aktuellen politischen Rahmenbedingungen.....	4
2.2. Ambitionierte Klimapolitik durch eine beschleunigte Energiewende.....	5
2.3. Resultierende Annahmen der Szenarien	6
3. Mögliche Maßnahmen im Stromsektor und ihre Effekte	7
3.1. Ausbaupfade für erneuerbare Energien	7
3.2. CO ₂ Emissionen des Stromsektors	11
3.3. Restlicher Kraftwerkspark und Absicherung.....	12
3.4. Entwicklung der Börsenstrompreise.....	13
4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	15
5. Referenzen.....	17
6. Anhang: Tabellen zur installierten Leistung und Erzeugungsmengen aller Szenarien....	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausbau der Erneuerbaren gemäß Referenzentwicklung.....	4
Abbildung 2: Strommix 2030 in der Referenzentwicklung und bei Einhaltung des 65% EE-Ziels.	8
Abbildung 3: Strommix 2030 in den ambitionierteren Szenarien.	8
Abbildung 4: Erneuerbare Kapazitäten in den Szenarien	10
Abbildung 5: Jährlicher Nettozubau von PV und Wind Onshore von 2020 bis 2030.	10
Abbildung 6: CO ₂ -Emissionen des Deutschen Stromsektors im Jahr 2030.....	11
Abbildung 7: Thermische Kraftwerkskapazitäten in den Szenarien im Jahr 2030.....	12
Abbildung 8: Entwicklung der Börsenstrompreise.....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kapazitäten von Kohlekraftwerken in Deutschland [GW].....	6
Tabelle 2: Annahmen der verschiedenen Szenarien.....	6
Tabelle 3: Installierte Leistungen in den Szenarien im Jahr 2030.....	20
Tabelle 4: Erzeugungsmengen in den Szenarien im Jahr 2030	21

1. Ziele der deutschen Energiepolitik und ihre Umsetzung

1.1 Ausgangssituation

Die Große Koalition hat sich im Koalitionsvertrag auf die Beibehaltung der Klimaschutzziele verständigt: Bis zum Jahr 2020 sollen die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 40% zurückgehen, bis 2050 um 80-95% gesenkt werden. Entgegen der Zielvorgabe sind die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Verlauf der letzten acht Jahre jedoch nahezu konstant bei 900 Mio t CO₂-Äquivalenten geblieben (Jahr 2009: 913 Mio. t; 2017: 905 Mio t). Der Klimaschutzplan 2050 sieht eine Reduzierung von Treibhausgasemissionen um mindestens 40% bis 2020 (auf 749 Mio. t CO₂-Äquivalent) und 55-56% bis 2030 (auf 543-562 Mio. t CO₂-Äquivalent) gegenüber 1990 vor (BMUB 2016). Die bisher vereinbarten Ziele sind jedoch nicht ausreichend, um die im Pariser Klimaschutzvertrag vereinbarten Einsparungen, zur Einhaltung der globalen Erwärmung bis maximal 2 - wenn möglich sogar 1,5 Grad - zu erreichen und müssen daher noch entsprechend angepasst werden (Parra u. a. 2018). Aktuelle Prognosen gehen jedoch davon aus, dass ohne zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen bereits die aktuellen Ziele verfehlt werden.

Schätzungen gehen davon aus, dass die Zielverfehlung für 2020 8-10% beträgt (BMU 2018; Agora Energiewende 2018). Dies entspricht einem jährlichen Fehlbetrag von ungefähr 100 Millionen t CO₂. Eine Zielverfehlung in 2020 bedeutet, dass selbst bei Einhaltung des 2030-Ziels das anvisierte Restbudget an Treibhausgasemissionen überschritten wird. So droht bis zum Jahr 2020 die kumulierte Zielverfehlung seit 2010 auf 650 Mio. Tonnen CO₂ anzuwachsen. Dies entspricht fast drei Viertel der jährlichen Gesamtemission der Bundesrepublik Deutschland, die durch zusätzliche Anstrengungen in den nächsten Jahren ausgeglichen werden müssen (Klima-Allianz 2018).

Die im Klimaschutzplan für die Energiewirtschaft anvisierten Reduktionsziele liegen bei 61-62% bis zum Jahr 2030. Die Emissionen der Energiewirtschaft entstammen zu größten Teilen aus der Stromerzeugung. Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung lagen im Jahr 2017 bei etwa 328 Mio. t. Dabei verursachte die Stromerzeugung aus Braunkohle Emissionen von etwa 153 Mio. t CO₂ und die aus Steinkohle weitere 87 Mio. t. Damit sind drei Viertel der

energiebedingten und ein Viertel der gesamten deutschen Emissionen auf kohlebasierte Stromerzeugung zurückzuführen (DIW Berlin, Wuppertal Institut, und Ecologic Institut 2018). Die Einhaltung der Klimaschutzziele bedingt daher einen Kohleausstiegsplan, was in einer Vielzahl von Studien intensiver untersucht wurde (Göke u. a. 2018; Oei u. a. 2018; Oei, Gerbaulet, Kemfert, Kunz, und Hirschhausen 2015; Oei, Gerbaulet, Kemfert, Kunz, Reitz, u. a. 2015).

Hieraus resultierend hat die von der Bundesregierung eingesetzte Kohlekommission im Januar 2019 einen Kompromissvorschlag mit einem Kohleausstieg bis 2035 oder 2038 gemacht (Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ 2019). Das vereinbarte Abschaltjahr ist nicht ausreichend, um die Klimaschutzziele von Paris einzuhalten (Parra u. a. 2018). Da dieses Enddatum jedoch auch von den betroffenen Regionen, Arbeitnehmerverbänden und der Industrie mitgetragen wird, stellt es trotzdem einen wichtigen Einstieg in einen noch Jahre dauernden Ausstiegsprozess dar, der jetzt entsprechend von der Bundesregierung durch ein Kohleausstiegsgesetz umgesetzt werden muss.

Für die nächsten Jahre verbleiben jedoch noch weitere wichtige Bausteine, die miteinbezogen werden müssen. Neben der Einhaltung der europäischen Schadstoffgrenzwerte ab 2021 muss für eine Einhaltung der internationalen Klimaschutzziele eine frühzeitigere Abschaltung der letzten Kohlekraftwerke bis 2030 angepeilt werden (Parra u. a. 2018). Analysen zeigen, dass neben dem Hambacher Wald und den bedrohten Dörfern in NRW auch in der Lausitz und im Mitteldeutschen Revier keine weiteren Dörfer mehr abgebaggert werden müssen, da ausreichend Kohlemengen in den bereits genehmigten Tagebaufeldern vorhanden sind (DIW Berlin 2017; Oei u. a. 2019, 2014). Darüber hinaus muss zur Verhinderung von nicht benötigten Investitionen der Bau von neuer Erdgasinfrastruktur kritisch geprüft werden. Neben den Energiesektoren müssen zudem auch die anderen Sektoren, insb. der Verkehrs- und Wärmesektor, eine schnellstmögliche Dekarbonisierung anstreben.

1.2 Ausbau erneuerbarer Energien

Um neben der Einhaltung der Klimaschutzziele bei dem anstehenden Kohleausstieg die Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit des Deutschen Stromsektors nicht zu gefährden muss der Ausbau erneuerbarer Energien in den nächsten Jahren noch entsprechend beschleunigt

werden. Der Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor ist gemessen an der Erfüllung der energie- und klimapolitischen Ziele eine der erfolgreichsten Maßnahme der deutschen Energiepolitik und Kernelement der Energiewende. Die aktuellen Ziele des EEG sehen einen Anteil von 35% am Stromverbrauch in 2020 und 40 bis 45% in 2025 vor. Mit einem Wert von 36% im Jahr 2017 ist die Zielerreichung für 2020 sehr wahrscheinlich. Für 2030 sieht der Koalitionsvertrag daher eine entsprechende Anhebung des Ziels von aktuell 50% auf 65% vor (Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD 2018).

Im aktuellen EEG wird ab 2020 ein Brutto-Ausbau von 2,5 GW für Photovoltaik, 2,9 GW für Wind Onshore und 0,2 GW für Biomasse anvisiert. Für Onshore-Windenergie und Photovoltaik sind in den nächsten drei Jahren zudem Sonderausschreibungen von jeweils 4 GW vorgesehen, um den zuletzt schwachen Zubau zu kompensieren. Für Offshore Windanlagen wird für das Jahr 2030 ein Ziel von 15 GW Wind Offshore angesetzt (BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016). Ab 2020, wenn die EEG-Förderung der ersten Anlagen ausläuft, ist zudem zunehmend mit altersbedingten Stilllegungen der ältesten Anlagen zu rechnen. Unter Berücksichtigung all dieser Aspekte ergibt sich die dem aktuellen politischen Rahmen entsprechende Entwicklung der erneuerbaren Kapazitäten wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist.¹ Es wird deutlich, dass bei dem derzeit geplanten Ausbau der erneuerbaren Kapazität nur ein Anteil von 55% an der Stromnachfrage erreicht wird. Für die Zielerreichung der im Koalitionsvertrag anvisierten 65% müssten die jährlichen Ausbauraten entsprechend erhöht werden. Um die Einhaltung der international vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen, müsste der Anteil erneuerbarer Energieanlagen bis 2030 jedoch noch deutlich erhöht werden was weitere jährliche Ausschreibungen bedingt. In den folgenden Abschnitten wird daher näher untersucht, welche jährlichen Zubaumengen benötigt werden, um entsprechend höhere Ziele von erneuerbarer Energien im Jahr 2030 und den daraus resultierenden Auswirkungen auf den Stromsektor zu untersuchen.

¹ Bis 2024 entsprechen die Werte der aktuellen EEG-Mittelfristprognose der Übertragungsnetzbetreiber. Unter Rückgriff auf Daten zur Altersstruktur der installierten Anlagen wurden diese Werte ab 2024 konsistent fortgeschrieben. Dabei wurde unter anderem angenommen, dass 20% der Anlagen nach Ablauf der EEG-Förderung noch fünf Jahre weiterbetrieben werden können.

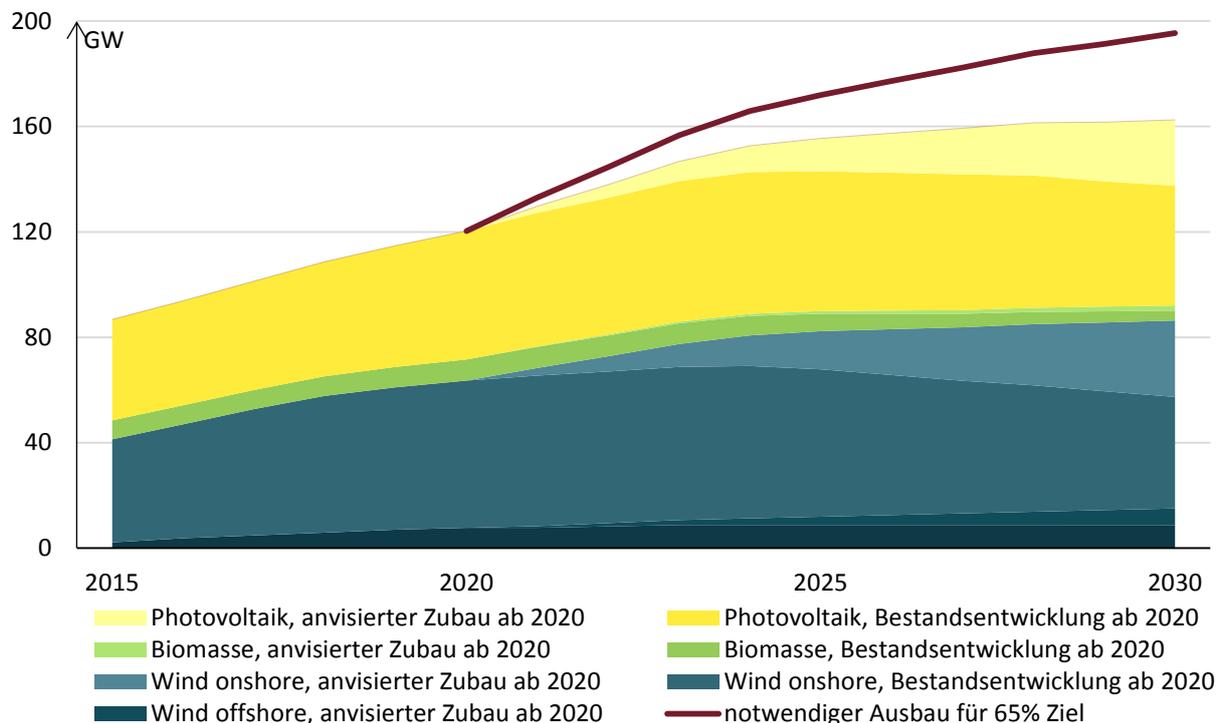


Abbildung 1: Ausbau der Erneuerbaren gemäß Referenzentwicklung.

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (50Hertz u. a. 2017; neon u. a. 2017; Baginski, Paul u. a. 2018).

2. Szenarien und Methodik

Zur Analyse von Klimaschutzmaßnahmen im Stromsektor wird das Investitionsmodell dynELMOD eingesetzt, welches den kostenoptimalen Kraftwerkspark im europäischen Stromsektor bis 2050 unter Berücksichtigung politischer und technischer Randbedingungen modelliert. Hierauf aufbauend werden mit dem Kraftwerkseinsatz- und Netzmodell für Deutschland (ELMOD) Großhandelspreise für Strom berechnet.² Insgesamt wurden fünf unterschiedliche Szenarien untersucht.

2.1. Fortsetzung der aktuellen politischen Rahmenbedingungen

Die ersten zwei Szenarien „Später Kohleausstieg“ und „Später Kohleausstieg und 65%“ beziehen sich auf den aktuellen politischen Rahmen und unterscheiden sich nur hinsichtlich

² Eine ausführliche Modelldokumentation der beiden Modelle findet sich bei Egerer (2016) sowie Gerbaulet und Lorenz (2017).

des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Im Referenzfall wird eine Entwicklung gemäß Abbildung 1 festgeschrieben, während im zweiten Fall gemäß dem Koalitionsvertrag ein Anteil von 65%, ggf. auch durch zusätzliche Investitionen, erreicht werden muss. Der Ausbau von Offshore Wind ist von diesen Investitionen ausgenommen; hier wird in beiden Fällen eine Kapazität von 15 GW angenommen. Die Entwicklung der Kohlekapazitäten orientieren sich in beiden Szenarien an den Empfehlungen der Kohlekommission (s. Tabelle 1).

2.2. Ambitionierte Klimapolitik durch eine beschleunigte Energiewende

Die weiteren drei Szenarien „**85% und Kohleausstieg 2030**“, „**100% und Kohleausstieg 2030**“ und „**100%, Kohle- und Erdgasausstieg 2030**“ sind deutlich ambitionierter und zeigen Entwicklungen und Ziele, die über die aktuellen politischen Absichten und Entschlüsse hinausgehen: Das Ziel für den erneuerbaren Ausbau steigt auf 85% und sogar 100% und für Wind Offshore Anlagen werden mit 20 und 35 GW deutliche höhere Kapazitäten festgelegt (s. Tabelle 2). Bei einem 100% Anteil erneuerbarer Energien wird vorgegeben, dass der Stromverbrauch und die Erzeugung erneuerbare Energien in Deutschland die gleiche Höhe haben. Da gleichzeitig auch Stromaustausch mit dem Ausland stattfindet, schließt dies bei einem Nettoexport die fossile Erzeugung nicht vollständig aus. In allen drei Szenarien ist ein beschleunigter Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 abgeschlossen. Darüber hinaus findet im „**100%, Kohle- und Erdgasausstieg**“ Szenario bis 2030 zusätzlich auch ein Ausstieg aus der Erdgasverstromung statt. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten wird in den beiden 100% Szenarien davon ausgegangen, dass durch zusätzliche Investitionen bis zum Jahr 2030 Geothermie als Quelle der Stromerzeugung mit einem Potential von jährlich 25 TWh hinzugebaut werden kann.

2.3. Resultierende Annahmen der Szenarien

Die getroffenen Annahmen für die fünf Szenarien sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Kapazitäten von Kohlekraftwerken in Deutschland [GW].

Szenarien		2015	2020	2025	2030
Später Kohleausstieg 65% und später Kohleausstieg	Steinkohle	24,8	20,6	16,4	7,2
	Braunkohle	20,9	18,2	14,3	9,2
85% und Kohleausstieg 2030 100% und Kohleausstieg 2030 100%, Kohle- und Erdgasausstieg 2030	Steinkohle	24,8	16,9	7,2	0,0
	Braunkohle	20,9	12,7	9,1	0,0

Tabelle 2: Annahmen der verschiedenen Szenarien.

Szenariobezeichnung	EE-Ausbau	Kohleausstieg	Offshore Wind	Erdgas- ausstieg
Später Kohleausstieg	gemäß Abbildung 1	2035-2038	15 GW	nach 2030
65% und später Kohleausstieg	65% Ziel	2035-2038	15 GW	nach 2030
85% und Kohleausstieg 2030	75% Ziel	2030	20 GW	nach 2030
100% und Kohleausstieg 2030	100% Ziel	2030	35 GW	nach 2030
100%, Kohle- und Erdgasausstieg 2030	100% Ziel	2030	35 GW	2030

Für alle Szenarien wird im Jahr 2030 ein Jahresverbrauch von 547 TWh und eine Spitzenlast von 84 GW basierend auf dem Szenario B (mittleres Szenario) des aktuellen Netzentwicklungsplans angenommen. Auch Volllaststunden erneuerbarer Energien werden einheitlich gemäß der aktuellen Mittelfristprognose der Übertragungsnetzbetreiber angelegt. Der angenommene europäische CO₂-Preis steigt von ungefähr 25€ in 2020 auf 53 €/tCO₂ im Jahr 2030. Der Nachfrage und Erzeugung aus Wind und Photovoltaik liegen historische Profile von 2015 zugrunde (neon u. a. 2017; 50Hertz u. a. 2017). Die prozentualen Ziele für die Stromerzeugung erneuerbarer Energien beziehen sich im angewendeten Modellansatz auf Nettostromverbrauch und -erzeugung.³

³ Die Konvention in der energiepolitischen Debatte sind dagegen Prozentziele, die auf Grundlage von Bruttozahlen berechnet werden und damit auch Leitungsverluste und Eigenverbrauch berücksichtigen. Solche lassen sich aber auf Grund mathematischer Restriktionen des verwendeten Optimierungsmodells nicht vorgeben. Damit werden die in Tabelle 2 aufgeführten Ziele bezogen auf Bruttozahlen in den Ergebnissen vermutlich knapp unterschritten. Für 2015 ergibt sich beispielsweise eine Abweichung von ungefähr 1% zwischen einem aus im Modell bestimmten Nettowerten berechnetem EE-Anteil und dem offiziellen Wert (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2018).

3. Mögliche Maßnahmen im Stromsektor und ihre Effekte

Die folgenden Ergebnisse der Modellrechnungen erlauben Rückschlüsse, ob der aktuelle politische Rahmen zur Erreichung der klimapolitischen Ziele im Stromsektor ausreicht. Darüber hinaus zeigen die weiteren Szenarien, welche Maßnahmen zur Umsetzung ambitionierterer Ziele notwendig sind. Ein besonderer Schwerpunkt der Analyse liegt dabei auf dem Ausbaupfad erneuerbarer Energien (Abschnitt 3.1), den resultierenden CO₂-Emissionen des Stromsektors (Abschnitt 3.2), der Versorgungssicherheit (Abschnitt 3.3) und den Auswirkungen auf die Börsenstrompreise (Abschnitt 3.4). Im Anhang befinden sich zudem weitere Ergebnistabellen für die resultierenden installierten Leistungen (s. Tabelle 3) und erzeugten Strommengen (s. Tabelle 4) in allen Szenarien.

3.1. Ausbaupfade für erneuerbare Energien

In Abbildung 2 ist die Stromerzeugung in den beiden ersten Szenarien „**Später Kohleausstieg**“ und „**65% und später Kohleausstieg**“ dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einer Entwicklung der erneuerbaren Kapazität gemäß dem aktuellen politischen Rahmen nur ein Anteil von 55% an der Stromnachfrage erreicht wird. Im 65% Szenario werden ab 2020 jährlich zusätzlich 1,9 GW Photovoltaik und 1,4 GW Wind Onshore zugebaut. Damit ergibt sich ein notwendiger jährlicher Bruttozubaupfad von 4,4 GW für Photovoltaik, 4,3 GW für Wind Onshore (siehe auch Abbildung 5) und 0,5 GW für Biomasse.

Da in beiden Szenarien von einem maximalen Zubau von Wind Offshore auf 15 GW im Jahr 2030 ausgegangen wird, könnten bei einem entsprechend stärkeren Ausbau auch geringere Zubauraten zur Zieleinhaltung ausreichen. Dieser Effekt zeigt sich deutlich bei einem Vergleich mit den ambitionierteren Szenarien „**85% und Kohleausstieg 2030**“, „**100% und Kohleausstieg 2030**“ und „**100%, Kohle- und Erdgasausstieg 2030**“. Gerade beim Schritt von 85% zu 100% fällt der zusätzliche Ausbau von Photovoltaik und Wind Onshore nur moderat aus, obwohl zunehmend Standorte mit niedrigeren Volllaststunden genutzt werden müssen. Dies ist auf die höheren Gesamtkapazitäten für Wind Offshore von 20 bzw. 30 GW im Jahr 2030 zurückzuführen, die, wie in Abbildung 3 zu sehen, auf Grund hoher Auslastung wesentlich zur Erfüllung des EE-Ziels beitragen.

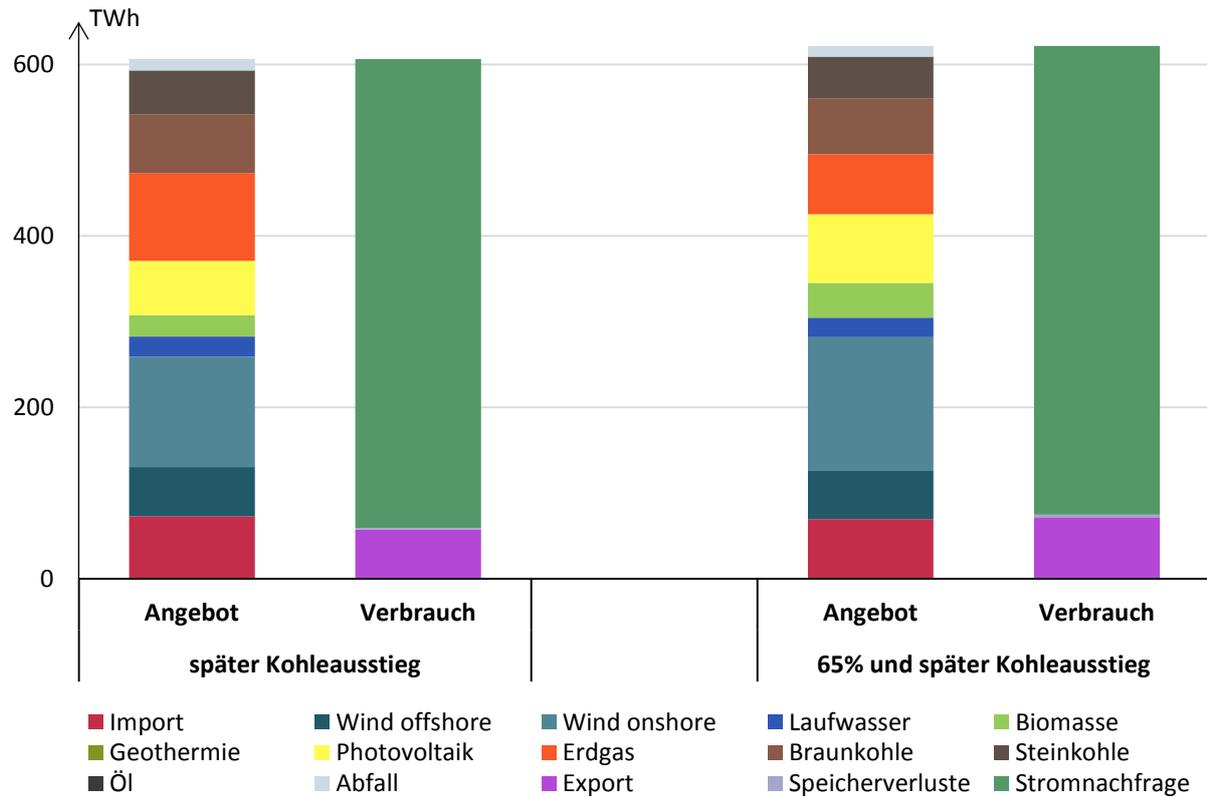


Abbildung 2: Strommix 2030 in der Referenzentwicklung und bei Einhaltung des 65% EE-Ziels.

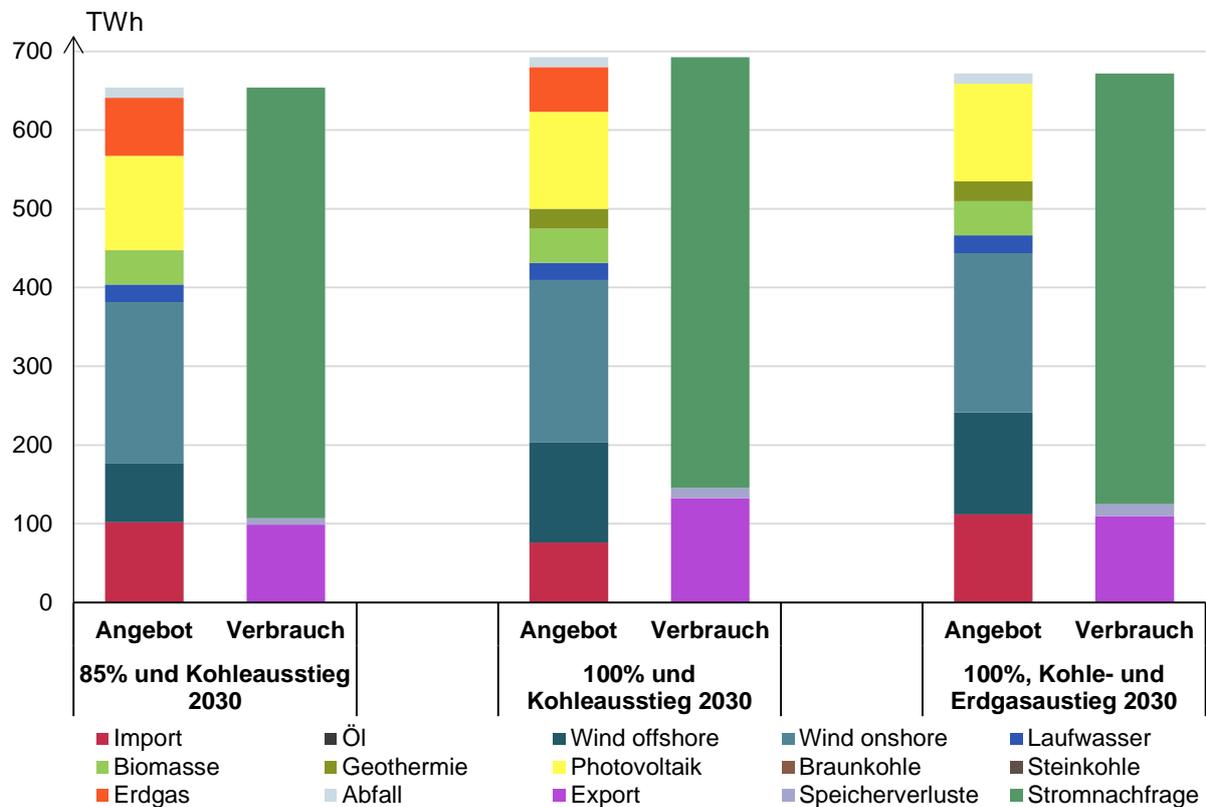


Abbildung 3: Strommix 2030 in den ambitionierteren Szenarien.

Von allen betrachteten Szenarien wird Deutschland nur im Referenzszenario zum Nettoimporteur von Strom. Im Falle von „**100% und Kohleausstieg 2030**“ besteht ein deutlicher Exportüberschuss und in allen anderen Fällen ist die Außenhandelsbilanz nahezu ausgeglichen. Grundsätzlich ist jedoch zu beobachten, dass mit zunehmender Dekarbonisierung, also der Reihenfolge der Szenarien in Tabelle 2, das Außenhandelsvolumen, also die Summe von Stromexporten und –importen deutlich wächst. Beläuft sich dieser Wert im Referenzszenario noch auf 130 TWh wächst er im Extremfall auf bis zu 230 TWh bei „**100%, Kohle- und Erdgasausstieg 2030**“. Dies zeigt wie wichtig es ist zusätzlich zur Fortsetzung der Deutschen Energiewende auch die Dekarbonisierung in Europa voranzutreiben (UBA 2018; European Commission 2018). In den ambitionierten Szenarien wird ein wachsender Anteil des erneuerbaren Stroms nicht direkt genutzt, sondern zunächst in synthetisches Gas umgewandelt wird, die wiederum zu Spitzenlastzeiten in den entsprechenden Anlagen rückverstromt werden. Durch diesen Prozess kommt es in den ambitionierten Szenaren zu einem Anstieg der durch Speicherung bedingten Energieverluste. Im Szenario „**100%, Kohle- und Erdgasausstieg 2030**“ speichern die Anlagen beispielsweise 20 TWh in Zeiten hoher Erzeugung aus Erneuerbaren ein, um zu Spitzenlastzeiten insgesamt wieder 7,5 TWh zur Verfügung zu stellen.

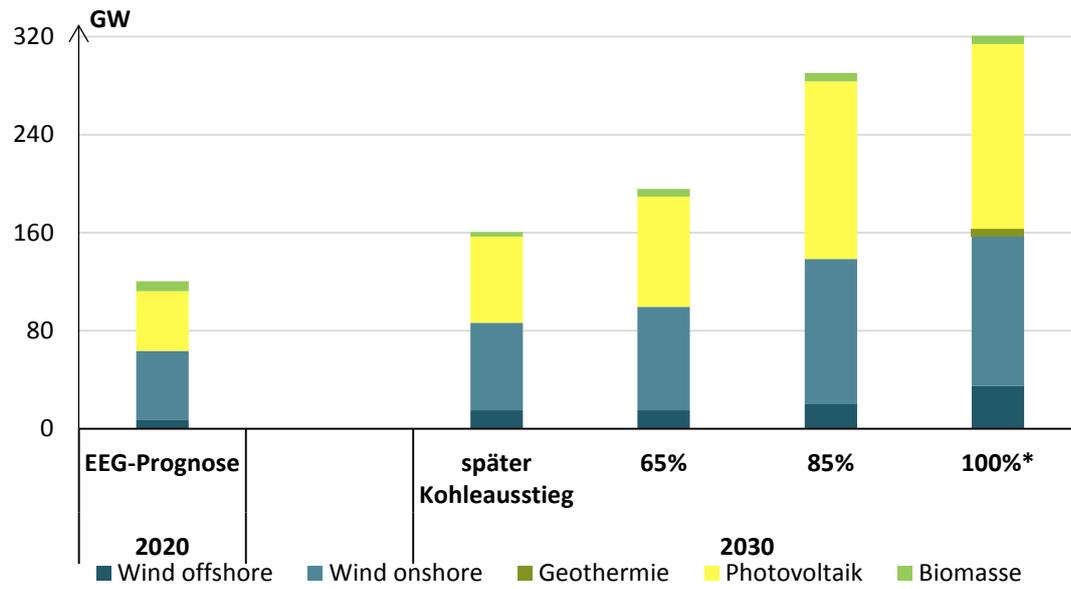


Abbildung 4: Erneuerbare Kapazitäten in den Szenarien⁴

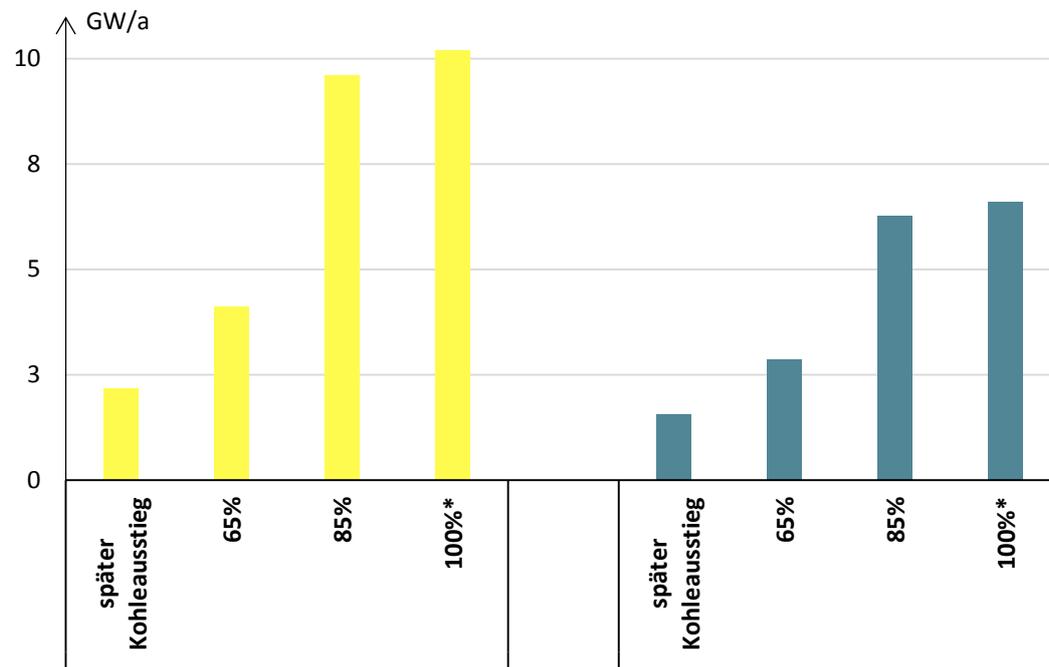


Abbildung 5: Jährlicher Nettozubau von PV und Wind Onshore von 2020 bis 2030.

⁴ 100%* bezieht sich auf das „100% ohne Kohle“ Szenario. Der Ausbau erneuerbarer Energien in „100% ohne Kohle und Erdgas“ ist jedoch nahezu identisch.

3.2. CO₂ Emissionen des Stromsektors

Zur Bewertung der resultierenden CO₂ Emissionen der verschiedenen Szenarien wurde das im Klimaschutzplan vorgegebene Sektorziel der Energiewirtschaft für 2030 – 61-62% Reduktion gegenüber 1990 - an Hand historischer Energiebilanzen auf den Stromsektor heruntergerechnet, wodurch sich ein Wert von 143 Millionen tCO₂ ergibt. Abbildung 6 macht deutlich, dass die Emissionen sehr viel stärker von den Annahmen zur Kohleverstromung als vom jeweiligen Anteil erneuerbarer Energie abhängen. Im Referenzfall wird das von der Bundesregierung anvisierte Ziel nicht erreicht; dies gilt auch für das 65% Szenario, wobei die Zielverfehlung hierbei im Rahmen der zu erwartenden rechnerischen Unschärfe liegt.

In den ambitionierteren Szenarien führt der beschleunigte Kohleausstieg zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen. Da es gleichzeitig zu einem stärkeren Ausbau der erneuerbaren Energien kommt, findet kaum eine Verlagerung von Emissionen auf Erdgaskraftwerke statt, wie ein Vergleich des „65% und später Kohleausstieg“ und „85% und Kohleausstieg 2030“ Szenarios zeigt. Die Emissionsreduktion durch einen weiteren Ausbau erneuerbarer Energien bis zu 100% ist allerdings ebenfalls gering, wenn dies nicht direkt mit einem kompletten Erdgasausstieg kombiniert wird.

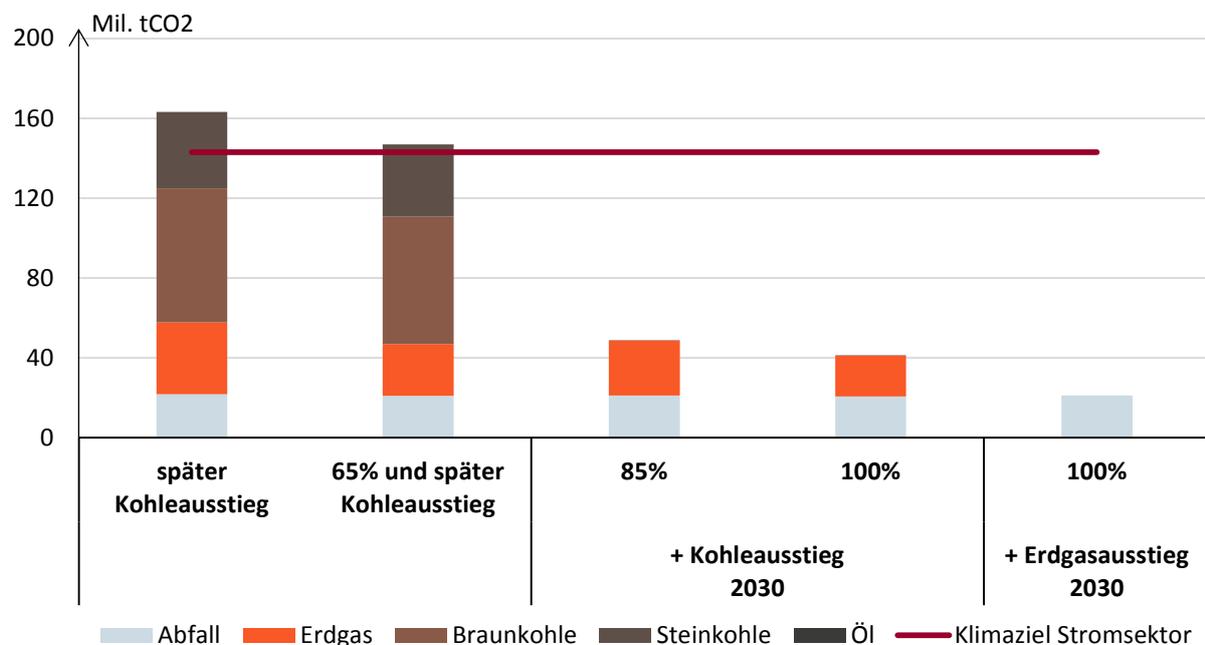


Abbildung 6: CO₂-Emissionen des Deutschen Stromsektors im Jahr 2030

3.3. Restlicher Kraftwerkspark und Absicherung

Da die bedeutsamsten Technologien zur Erzeugung erneuerbaren Stroms, Photovoltaik und Wind, auf entsprechende Wetterverhältnisse angewiesen sind, werden auch in Zukunft weitere Technologien notwendig sein, um bei ungünstigen Wetterverhältnissen die Versorgungssicherheit in jeder Stunde des Jahres zu gewährleisten. Die Berechnungen ergeben in den ersten beiden Szenarien, dass die lückenlose Versorgung noch überwiegend durch konventionelle Kraftwerke, also verbleibende Kohle- und Erdgaskraftwerke, gesichert werden kann. Bei Abschaltung der Kohlekraftwerke in den 85% und 100% Szenarien wird deren Leistung fast vollständig durch Power-to-Gas Anlagen und zum Teil auch durch Erdgaskraftwerke und Geothermie ersetzt. Power-to-Gas bezeichnet hier eine Anlage aus Elektrolyseur und Gasturbine, die also Strom einspeichern, aber auch erzeugen kann. Der Anteil von stochastischen Größen, wie Stromimport oder erneuerbare Erzeugung, zur Spitzenlastdeckung ist in allen Fällen gering.

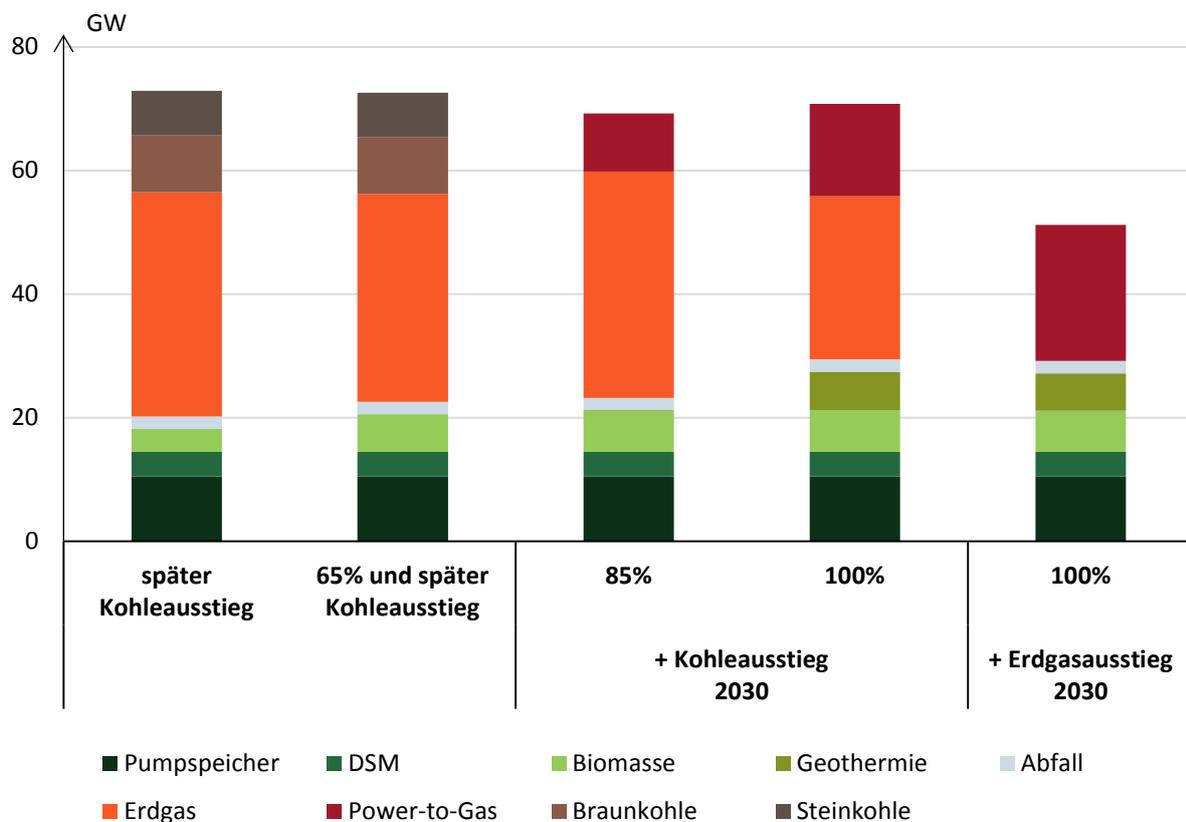


Abbildung 7: Thermische Kraftwerkskapazitäten in den Szenarien im Jahr 2030

Im Szenario mit 100% Erneuerbaren sowie Kohle- und Erdgasausstieg kommt es zu einem deutlichen Rückgang der gesicherten Kraftwerksleistung. Dies bedeutet, dass Spitzenlasten zu einem größeren Anteil von Stromimporten oder, auf Grund günstiger Wetterbedingungen von Erneuerbaren, gedeckt werden müssen. Grundsätzlich sind zur Erreichung höherer Sicherheitsniveaus weitere hier nicht näher diskutierte Maßnahmen denkbar, wie beispielsweise eine stärkere Nutzung weiterer Demand Side Management Potentiale oder von Batteriespeichern.

3.4. Entwicklung der Börsenstrompreise

Aufbauend auf dem modellierten Kraftwerkspark wird die Entwicklung der Börsenstrompreise für das Jahr 2020 und 2030 in den verschiedenen Szenarien ermittelt. Die Modellergebnisse für Börsenstrompreise liegen für das Jahr 2020 nahe an den aktuellen Future-Preisen der Strombörse, was die Plausibilität des Modellansatzes stützt. Aufgrund der geringen variablen Kosten sinken mit zusätzlichen Anteilen Erneuerbarer die Börsenstrompreise. Umgekehrt führt eine Verwendung von Erdgas aufgrund relativ hoher Rohstoffpreise und auf Grund zunehmender CO₂-Emissionspreise zu steigenden Strompreisen. Hieraus resultiert, dass der Preisanstieg durch einen beschleunigten Kohleausstieg durch den preissenkenden Effekt der erneuerbaren Energien überkompensiert wird.

In den Modellrechnungen werden die Rohstoffpreise sowie die CO₂-Zertifikatepreise exogen vorgegeben; diese bewegen sich 2030 in einer Spanne von 18-30 €/MWh für Erdgas, sowie 40-60 €/t CO₂; diese Bandbreite ist in der Abbildung 8 durch die schraffierte Fläche abgebildet. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Strompreise für drei Szenarien beispielhaft auf. Dabei wird zwischen zwei Effekten unterschieden:

- Der Balken „Preise bei aktuellen CO₂- und Erdgaspreisen“ zeigt die Entwicklung der Börsenpreise unter der Annahme konstanter Rohstoffpreise. Dabei ergibt sich ein im Vergleich zu 2018 leicht ansteigendes Preisniveau für einen späten Kohleausstieg. Bei steigenden Anteilen Erneuerbarer sinkt der Börsenstrompreis dagegen.
- Der gesamte Balken 2030 inklusive der gestrichelten Flächen beschreibt dagegen den erwarteten Anstieg der Erdgas- und CO₂-Preise, welche auf den Börsenpreis durchschlagen. Steigende Kosten für CO₂-Zerfitkate und Erdgas führen resultieren hierbei

in einer deutlich stärkeren Erhöhungen des Börsenstrompreises als der Ausstieg aus der Kohleverstromung. Beides kann durch einen stärkeren Ausbau der Erneuerbaren Energien jedoch kompensiert werden.

Ein leichter Anstieg der Börsenstrompreise ab 2020 in allen Szenarien erhöht grundsätzlich die Profitabilität der verbleibenden Stromerzeugungskapazitäten und ermöglicht weitere Forschung und Innovationen in Flexibilitätstechnologien und Energiespeichern. Da der Börsenstrompreis im „85% ohne Kohle“ Szenario in der gleichen Größenordnung wie in den letzten 10 Jahren liegt, sind nur begrenzte Auswirkungen für die energieintensive Industrie zu erwarten.

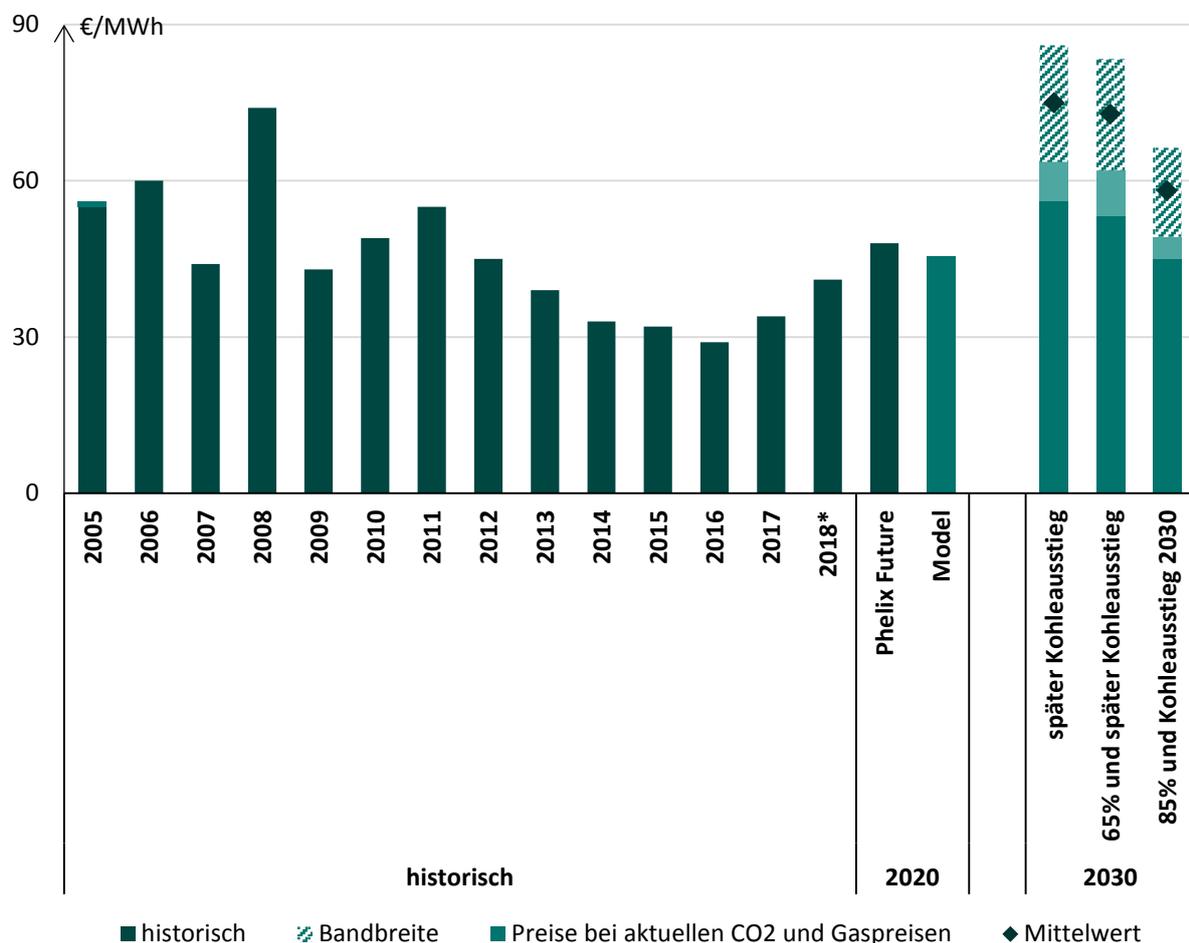


Abbildung 8: Entwicklung der Börsenstrompreise⁵

⁵ Die „Bandbreite“ entspricht dem 10% bis 90% Quantil. Der Vergleich zwischen Modelergebnissen und der Terminmarktnotierung des Phelix Future dient der Plausibilisierung des Verfahrens.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein entscheidender Bestandteil bei der Erzielung nationaler, europäischer und internationaler Klimaschutzziele; dies gilt insbesondere für den Stromsektor, in dem eine bis zu 100%-ige Versorgung mit Erneuerbaren sicher und kostengünstig erreicht werden kann. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt bis zum Jahr 2020 den Ausstoß von Treibhausgasen gegenüber 1990 um 40% zu reduzieren; bis 2050 sollen die Emissionen sowohl in Deutschland als auch in der gesamten Europäischen Union sogar um mindestens 80-95% sinken. Die gegenwärtig geplanten und die von der Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung verabschiedeten politischen Instrumente sind allerdings nicht ausreichend, um die deutschen Klimaschutzziele für 2020 als auch für 2030 einzuhalten. Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen eines verstärkten Ausbaus erneuerbarer Energien im Stromsektor in Verbindung mit einem Kohleausstieg bis 2030; durch diese Maßnahmen soll u.a. die dauerhafte Verfehlung der Klimaschutzziele verhindert werden.

Mit den aktuell im EEG festgelegten Ausbaukorridoren wird im Jahr 2030 ein Anteil von ca. 55% in der Stromerzeugung erreicht. Der gegenwärtige Koalitionsvertrag sieht eine Anhebung des Erneuerbarenziels für 2030 auf 65% vor. Um dieses Ziel zu erreichen bedarf es einer Anpassung des jährlichen Bruttozubaues auf 4,4 GW für Photovoltaik und auf 4,3 GW für Wind Onshore. Bei einer weiteren Steigerung der Ausbauraten sowie einem Anstieg von Wind Offshore von geplanten 15 GW auf 20-35 GW kann der Anteil der Erneuerbaren bis 2030 auch auf 85% - 100% gesteigert werden. Dadurch würde ein wichtiger Beitrag zur Einhaltung der deutschen und europäischen Klimaschutzziele erreicht und international ein Zeichen für eine Energiewende mit Erneuerbaren gesetzt. Des Weiteren ist der Stromsektor in der Lage, die abzusehende Zielverfehlung anderer Sektoren zu kompensieren, was ökonomisch und umweltpolitisch effizient ist.

Zur Analyse von Klimaschutzmaßnahmen im Stromsektor werden in dieser Studie ein Investitionsmodell und ein Kraftwerkseinsatzmodell verwendet, um den kostenminimalen Kraftwerkspark in Deutschland und Europa bis 2030 bzw. 2050 zu ermitteln. Dabei werden fünf unterschiedliche Szenarien untersucht, welche unterschiedliche Zeithorizonte für den Kohle-

ausstieg (2038 und 2030) und unterschiedliche Anteile Erneuerbarer am Stromverbrauch (55%, 65%, 85%, 100%) berücksichtigen; darüber hinaus beinhaltet ein Szenario neben dem Kohleausstieg auch den Erdgasausstieg.

Die Modellergebnisse zeigen, dass der Ausbau erneuerbarer Energien eine effiziente Ergänzung zu einem beschleunigten Kohleausstieg darstellt, und auch eine Vollversorgung mit Erneuerbaren (100%) im Stromsektor möglich ist. Bei einer Abschaltung der Kohlekraftwerke bis 2030 wird dessen Kapazität in den 85%- bzw. 100%-Erneuerbaren-Szenarien überwiegend durch Gaskraftwerke mit synthetischem Gas (Power-to-Gas Anlagen) ersetzt, zu einem geringen Teil auch durch Erdgaskraftwerke bzw. Geothermie. Im Szenario Kohle- und Erdgasausstieg kann eine sichere Stromversorgung durch die vertiefte Integration in das europäische Stromnetz sowie die verstärkte Nutzung von Speichern gewährleistet werden.

Der Zubau von Erneuerbaren wirkt sich dämpfend auf die Börsenstrompreise aus, dagegen führt die Verwendung von Erdgas aufgrund relativ hoher Rohstoffpreise (18-30 €/MWh) zu steigenden Strompreisen. Auch die CO₂-Zertifikate werden im Lauf der Klimaschutzmaßnahmen teurer (40-60 €/t CO₂) und schlagen auf den Strompreis durch. Insgesamt ist für 2030 mit leicht steigenden Börsenstrompreisen zu rechnen; diese sind umso geringer, je höher der Anteil der Erneuerbaren ist. Da der resultierende Börsenstrompreis im „85% ohne Kohle“ Szenario in der gleichen Größenordnung wie im letzten Jahrzehnt liegt, sind nur sehr begrenzte Auswirkungen für die energieintensive Industrie zu erwarten.

Die Modellergebnisse zeigen, dass durch einen verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien sowie einen Kohleausstieg bis 2030, dringend benötigte Klimaschutzmaßnahmen getroffen werden können. Eine Kombination aus der Investition in erneuerbare Energien sowie Nachfragereduktion (Effizienzverbesserung und Verhaltensanpassungen) und –management (Stromspeicher, Demand-Side-Management) können darüber hinaus zur Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit der Stromversorgung beitragen. Um neben der deutschen Energiewende auch die internationale Ebene einzubeziehen sollte sich Deutschland zudem auch wieder verstärkter für die Umsetzung der Dekarbonisierung Europas und die Einhaltung der globalen Pariser Klimaschutzziele einsetzen.

5. Referenzen

- 50Hertz, Amprion, TenneT, und TransnetBW. 2017. „Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2017, zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber“. https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_2_Entwurf_Teil1.pdf.
- Agora Energiewende. 2018. „Das Klimaschutzziel von -40 Prozent bis 2020: Wo landen wir ohne weitere Maßnahmen? Eine realistische Bestandsaufnahme auf Basis aktueller Rahmendaten.“ Berlin.
- Baginski, Paul, Bellenbaum, Julia, Beran, Philip, Broll, Roland, Felling, Tim, Jahns, Christopher, Osinski, Paul, und Weber, Christoph. 2018. „Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus EEG geförderten Kraftwerken für die Kalenderjahre 2019 bis 2023“. Essen.
- BMU. 2018. „Klimaschutzbericht 2017 Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung“. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzbericht_2017_aktionsprogramm.pdf.
- BMUB. 2016. „Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“. Berlin, Germany. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2016. „Entwurf eines Gesetzes zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien [Referentenentwurf des BMWi (IIIB2) vom 14.04.2016]“. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/P-R/referentenentwurf-aenderung-eeg,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). 2018. „Erneuerbare Energien in Zahlen“. Berlin.
- DIW Berlin. 2017. „Klimaschutz und Betreiberwechsel: Die ostdeutsche Braunkohlewirtschaft im Wandel“. DIW Wochenbericht 6+7/2017. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. https://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.552191.de.
- DIW Berlin, Wuppertal Institut, und Ecologic Institut. 2018. „Die Beendigung der energetischen Nutzung von Kohle in Deutschland: Ein Überblick über Zusammenhänge, Herausforderungen und Lösungsoptionen“. Berlin. https://wupperinst.org/fa/redaktion/images_hq/publications/2018_Kohlereader_Final.pdf.
- Egerer, Jonas. 2016. „Open Source Electricity Model for Germany (ELMOD-DE)“. DIW Berlin Data Documentation 83. Berlin, Germany: DIW Berlin. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.528927.de/diw_datadoc_2016-083.pdf.

- European Commission. 2018. „Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy“. Communication from the Commission COM(2018) 773. Brussels, Belgium: EC.
- Gerbaulet, Clemens, und Casimir Lorenz. 2017. „dynELMOD: A Dynamic Investment and Dispatch Model for the Future European Electricity Market“. DIW Berlin, Data Documentation No. 88. Berlin, Germany.
- Göke, Leonard, Martin Kittel, Claudia Kemfert, Casimir Lorenz, Pao-Yu Oei, und Christian Von Hirschhausen. 2018. „Erfolgreicher Klimaschutz durch zügigen Kohleausstieg in Deutschland und Nordrhein-Westfalen“. *DIW Wochenbericht* 33/2018: 701–11. https://doi.org/10.18723/diw_wb:2018-33-1.
- Klima-Allianz. 2018. „Der Kohleausstiegsplan - Klimaschutz-Stillstand macht zusätzliche Anstrengungen nötig“. Berlin: Autor: Pao-Yu Oei.
- Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 2018. „Ein neuer Aufbruch für Europa: Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode“. Berlin. https://www.cdu.de/system/tdf/media/dokumente/koalitionsvertrag_2018.pdf?file=1.
- Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. 2019. „Abschlussbericht“. Berlin.
- neon, DIW Berlin, TU Berlin WIP, und Europa-Universität Flensburg. 2017. „Open Power System Data“. Data Platform. 1. Januar 2017. <http://open-power-system-data.org/>.
- Oei, Pao-Yu, Hanna Brauers, Claudia Kemfert, Martin Kittel, Leonard Göke, Christian von Hirschhausen, und Paula Walk. 2018. „Kohleausstieg in NRW im deutschen und europäischen Kontext - Energiewirtschaft, Klimaziele und wirtschaftliche Entwicklung“. 129. Politikberatung kompakt. Berlin: DIW Berlin. https://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.598422.de.
- Oei, Pao-Yu, Clemens Gerbaulet, Claudia Kemfert, Friedrich Kunz, und Christian von Hirschhausen. 2015. „Auswirkungen von CO₂-Grenzwerten für fossile Kraftwerke auf den Strommarkt und Klimaschutz“. 104. Politikberatung kompakt. Berlin, Germany: DIW. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.521081.de/diwkompakt_2015-104.pdf.
- Oei, Pao-Yu, Clemens Gerbaulet, Claudia Kemfert, Friedrich Kunz, Felix Reitz, und Christian von Hirschhausen. 2015. „Effektive CO₂-Minderung im Stromsektor: Klima-, Preis- und Beschäftigungseffekte des Klimabeitrags und alternativer Instrumente“. 98. Politikberatung kompakt. Berlin, Germany: DIW.
- Oei, Pao-Yu, Claudia Kemfert, Felix Reitz, und Christian von Hirschhausen. 2014. „Braunkohleausstieg – Gestaltungsoptionen im Rahmen der Energiewende“. 84. Politikberatung kompakt. Berlin, Germany: DIW. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.471589.de/diwkompakt_2014-084.pdf.
- Oei, Pao-Yu, Catharina Rieve, Christian Von Hirschhausen, und Claudia Kemfert. 2019. „Ergebnis vom Kohlekompromiss: Der Hambacher Wald und alle Dörfer können erhal-

ten bleiben.“ DIW Berlin - Politikberatung kompakt 132. DIW Berlin - Politikberatung kompakt. Berlin: DIW Berlin.

Parra, Paola Yanguas, Niklas Roming, Fabio Sferra, Michiel Schaeffer, Ursula Fuentes Hutfilter, Anne Zimmer, Tina Aboumahboub, und Bill Hare. 2018. „Science based coal phase-out pathway for Germany in line with the Paris Agreement 1.5°C warming limit: Opportunities and benefits of an accelerated energy transition“. Berlin: Climate Analytics.

https://climateanalytics.org/media/germany_coalphaseout_report_climateanalytics_final.pdf.

UBA. 2018. „Fact Sheet: EU 2050 strategic vision “A Clean Planet for All”. Brief Summary of the European Commission proposal“.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/eu_2050_strategic_vision_a_clean_planet_for_all.pdf.

6. Anhang: Tabellen zur installierten Leistung und Erzeugungsmengen aller Szenarien

Tabelle 3: Installierte Leistungen in den Szenarien im Jahr 2030

in GW	später Koh- leausstieg	65% und später Koh- leausstieg	85% und Kohleaus- stieg 2030	100% und Kohleaus- stieg 2030	100%, Kohle- und Erdgas- ausstieg
Abfall	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Öl	3,0	3,0	3,0	3,0	0,0
Steinkohle	7,2	7,2	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	9,2	9,2	0,0	0,0	0,0
Erdgas	36,3	33,6	36,6	26,4	0,0
Photovoltaik	70,5	89,9	144,9	150,8	150,7
Biomasse	3,7	6,1	6,6	6,8	6,7
Geothermie	0,0	0,0	0,0	6,2	6,0
Laufwasser	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Wind Onshore	71,3	84,6	118,6	121,9	118,9
Wind Offshore	15,0	15,0	20,0	35,0	35,0
Power-to-Gas	0,0	0,0	9,4	15,0	22,0
DSM	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Pumpspeicher	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

Tabelle 4: Erzeugungsmengen in den Szenarien im Jahr 2030

in TWh	später Koh- leausstieg	65% und später Koh- leausstieg	85% und Kohleaus- stieg 2030	100% und Kohleaus- stieg 2030	100%, Koh- le- und Erd- gasausstieg
Abfall	13,3	12,8	12,9	12,6	12,9
Öl	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Steinkohle	51,3	48,7	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	68,2	64,7	0,0	0,0	0,0
Erdgas	102,4	70,3	73,8	56,6	0,0
Photovoltaik	63,5	79,9	119,5	123,4	124,1
Biomasse	25,0	40,5	43,4	43,4	43,4
Geothermie	0,0	0,0	0	25,0	25,0
Laufwasser	23,3	23,0	22,4	22,2	22,7
Wind Onshore	129,0	155,1	204,6	206,3	202,6
Wind Offshore	57,4	57,1	74,7	126,7	129,2
Export	57,5	71,9	98,8	132,4	109,3
Import	72,9	69,6	102,1	76,3	111,9
Speicherverluste	1,8	2,9	8,1	13,1	15,5
Stromnachfrage	547,0	547,0	547,0	547,0	547,0