

Energiemarktszenarien und zukünftige Energie- und Rohstoffbeschaffungsoptionen

Im Auftrag von INEOS

Schlussbericht, April 2018 (Übersetzung aus dem englischen Original)

ewi Energy Research & Scenarios gGmbH

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

Tel.: +49 (0)221 277 29-100

Fax: +49 (0)221 277 29-400

www.ewi.research-scenarios.de

AUTOREN

Dr. Stefan Lorenczik

Max Gierkink

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Europäische und nationale Klimaziele	2
3	Strategien zur Erreichung der Klimaziele.....	7
4	Explorative Ermittlung des zukünftigen Energiebedarfs - Ein Gedankenexperiment	17
5	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	25
	Abkürzungsverzeichnis	26
	Literaturverzeichnis.....	27

1 EINLEITUNG

Deutschland hat sich auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene unterschiedliche Klimaziele gesetzt. Diese Ziele beziehen sich auf unterschiedliche Dimensionen und sind häufig nicht aufeinander abgestimmt; dennoch ist das übergeordnete Ziel, die nationalen Treibhausgasemissionen zu mindern. In dieser Hinsicht wird Deutschland voraussichtlich sein nationales Klimaziel für 2020, die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 40% zu senken, verfehlen.¹ Darüber hinaus droht Deutschland auch die europäischen Zielvorgaben in den Sektoren, die nicht vom EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) abgedeckt werden, zu verfehlen. Deutschland ist hier verpflichtet, die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 um 14% gegenüber 2005 zu reduzieren.²

Angesichts der Schwierigkeiten Deutschlands, seine Ziele in naher Zukunft zu erreichen, stellt sich die Frage, wie die existierenden Probleme überwunden werden können und welche Optionen zur Senkung der Treibhausgasemissionen vorhanden und kosteneffizient sind. Aktuelle Studien, welche die Entwicklung der Treibhausgasemissionen Deutschlands analysieren, konzentrieren sich typischerweise auf normative, zielorientierte Szenarien. Unter der Annahme, dass alle notwendigen Maßnahmen umgesetzt werden können, wird hier ein Weg zur Erreichung der Ziele aufgezeigt. Demgegenüber stehen explorative Szenarien (oft auch als business-as-usual Szenarien bezeichnet). Diese beschreiben mögliche zukünftige Entwicklungen basierend auf der Fortschreibung von Trends und beobachtetem Systemverhalten. In einer Vielzahl von Studien werden diese für gewöhnlich als Benchmarks genutzt, jedoch nicht im gleichen Ausmaß analysiert, wie normative Szenarien.

Vor diesem Hintergrund setzt sich diese Studie zum Ziel, drei Fragen zur zukünftigen Entwicklung des Energiesystems zu untersuchen: Erstens, was sind die Hindernisse für die Erreichung von Klimazielen? Zweitens, wie könnte sich das Energiesystem möglicherweise entwickeln, sollte das aktuelle Ambitionsniveau nicht erhöht werden? Und drittens, wie wird die Energienachfrage - insbesondere nach Gas - in diesem Fall aussehen und welche Beschaffungsmöglichkeiten gibt es?

Die Studie ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 analysieren wir existierende europäische und nationale Klimaziele - einschließlich ihrer Wechselwirkungen - da sie die Basis aktueller Studien zum Energiesystem darstellen. In Kapitel 3 werden zentrale Bestandteile von Strategien für das Erreichen der Klimaziele identifiziert. Dabei adressieren wir vor allem die Fragen, wie die Strategien in aktuellen Studien berücksichtigt werden und welche Probleme sich möglicherweise bei der Umsetzung ergeben. In Kapitel 4 entwickeln wir ein Gedankenexperiment zur möglichen Entwicklung der Energienachfrage für den Fall, dass sich der historische Trend fortgeschrieben. Dies dient als Basis zur Bestimmung einer oberen Grenze für die zukünftige Gasnachfrage und der Beurteilung möglicher Beschaffungsmöglichkeiten. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen.

¹ Im jüngsten Koalitionsvertrag wurde angekündigt, dass Maßnahmen definiert werden sollen, welche die Lücke zur Erreichung der Ziele schließen sollen. Mit anderen Worten wurde eingeräumt, dass die Ziele nicht erreicht werden.

² Siehe Klimaretter 2018

2 EUROPÄISCHE UND NATIONALE KLIMAZIELE

Die deutsche Klimapolitik zielt auf die Einhaltung zweier unterschiedlicher Klimaziele: die nationalen und sektoralen Ziele aus dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sowie die Ziele der Europäischen Union, einschließlich der Nationally Determined Contributions (NDC)-Verpflichtungen im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC). Diese beiden Ziele sind nicht unabhängig voneinander, sondern interagieren und können sich sogar widersprechen. Im Folgenden werden Ziele und zugehörige Mechanismen beschrieben und mögliche Wechselwirkungen analysiert.

2.1 EU Klimaziele

Die Europäische Union will ihre Treibhausgasemissionen bis 2020 um 20%, bis 2030 um 40% und bis 2050 um 80 bis 95%, gegenüber dem Stand von 1990 senken.³ Um diese Gesamtziele zu erreichen, werden die Sektoren in zwei Kategorien eingeteilt. Sektoren, die unter das EU ETS fallen, und Sektoren, die im Rahmen der Lastenteilung reguliert werden. Der Energiesektor, energieintensive Industrien und der europäische Luftverkehr fallen unter das EU ETS, während der Gebäudesektor, nicht energieintensive Unternehmen, der übrige Verkehrssektor sowie Abfall- und Landwirtschaft unter das System der Lastenteilung fallen.⁴ Der Hauptgrund für diese Aufteilung ist, dass die EU ETS-Sektoren große Treibhausgasemittenten umfassen, während die Emittenten in den Sektoren der Lastenteilung vor allem Haushalte sowie kleine und mittlere Unternehmen sind. Daher richtet sich die EU ETS-Richtlinie an Unternehmen, während sich das System der Lastenteilung an die Mitgliedstaaten richtet.

EU-Emissionshandelssystem

EU ETS-Teilnehmer müssen Zertifikate (EUA) für ihre jährlichen Emissionen einreichen. Die Mitgliedstaaten geben EUA über Auktionen oder kostenlose Zuteilung aus. Überschüssige Zertifikate können unter den Teilnehmern gehandelt oder für kommende Jahre gespart werden. Unternehmen reduzieren ihre Emissionen, wenn dies günstiger ist als der EUA-Preis. Da kostenlose Zertifikate verkauft werden können, wenn sie nicht benötigt werden, wird der Anreiz zur Emissionsminderung durch kostenlose Zuteilungssysteme in der Theorie nicht beeinträchtigt.⁵

Da die jährlichen Emissionen seit 2009 deutlich unter der Obergrenze des Emissionshandelssystems liegen und die Preise unter den erwarteten Werten liegen, wird das EU ETS derzeit reformiert.⁶ Während einige Studien (z. B. Elkerbout et al. 2017) argumentieren, dass die Marktkräfte im

³ Siehe EK 2018a

⁴ Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden nicht direkt unter den beiden Regimen berücksichtigt, sondern ex-post bilanziert (siehe Lastenteilungsentscheidung Art. 9).

⁵ Siehe Elkerbout et al. 2017

⁶ Die Folgen eines möglichen Austritts des Vereinigten Königreichs aus der EU im Jahr 2019 werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

EU ETS der ökonomischen Theorie zufolge gut funktionieren, fordern andere einen höheren EUA-Preis, um die Energieeffizienz und die technologische Innovation zur Treibhausgasminderung zu fördern (z. B. Carp 2017). Als erste Maßnahme für einen Anstieg des EUA-Preises, wurden durch das "Backloading" von Auktionen zwischen 2014 und 2016 insgesamt 900 Millionen Zertifikate zurückgehalten. Um die Menge an nicht benötigten Zertifikaten langfristig zu regulieren, wird ab 2019 ein Teil⁷ der überschüssigen Zertifikate in eine Marktstabilitätsreserve (MSR) übertragen, wo sie mit der Möglichkeit der Marktrückführung im Knappheitsfall, zunächst gehalten werden. Nach 2023 wird ein Mechanismus zur Löschung von Zertifikaten in der MSR eingerichtet. Dies führt zu einer langfristigen Reduzierung der Gesamtmenge an Zertifikaten.⁸

Darüber hinaus haben sich das Europäische Parlament, der Rat und die Kommission in den letzten Trilog-Verhandlungen auf Einzelheiten für die vierte EU ETS-Handelsperiode (2021 bis 2030) geeinigt.⁹ Die Emissionsobergrenze wird zukünftig pro Jahr um einen linearen Reduktionsfaktor von 2,2% sinken (derzeit 1,74%).¹⁰ Um einen rechtlichen Rahmen für die Mitgliedstaaten zu schaffen, welche die Stilllegung fossiler Kraftwerke anstreben, sieht das Abkommen ausdrücklich eine Löschung von Zertifikaten vor.¹¹ Ohne diese Maßnahme hätte eine nationale Stilllegung keine Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen, da verfügbare Zertifikate für Emissionen in anderen Ländern oder Sektoren genutzt werden können (sogenannter Wasserbetteffekt).¹²

Nicht-EU ETS Sektoren

Mit Ausnahme der Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)¹³ umfasst die Lastenteilungsverordnung alle Emittenten von Treibhausgasen, die nicht unter das EU ETS fallen. Sie teilt jedem Mitgliedstaat ein Emissionsreduktionsziel entsprechend seiner wirtschaftlichen Leistung zu. Für den aktuellen Zeitraum von 2010 bis 2020 zielt die Lastenteilungsentscheidung (ESD 2009) darauf ab, die Treibhausgasemissionen um 10% gegenüber 2005 zu reduzieren; Deutschland soll seine Emissionen um 14% reduzieren. Für die Jahre 2021 bis 2030 zielt eine Folgeverordnung auf eine Reduzierung um 30% mit einem deutschen Ziel von 38% ab.¹⁴

Tabelle 1 fasst die für Deutschland relevanten europäischen Klimaziele zusammen. Im Jahr 2016 war die gesamteuropäische Zielerreichung für 2020 auf einem guten Weg. Deutschland hingegen hatte seine Emissionen im Jahr 2016 gegenüber 2005 nur um 4% reduziert. Eine weitere Reduzierung um 10% bis 2020 wäre erforderlich, um die Verpflichtungen der Lastenteilung allein, d. h. ohne den Erwerb von überschüssigen Berechtigungen anderer Staaten, zu erfüllen.

⁷ Den Trilog-Verhandlungen zufolge 24% von 2019 bis 2023.

⁸ Siehe EK 2018c

⁹ Siehe Council of the European Union 2017

¹⁰ Auf Basis des Gesamtreduktionsziels.

¹¹ Siehe Sørhus et al. 2017

¹² Dies gilt nur, wenn es keine überschüssigen Zertifikate gibt. Wenn mehr Zertifikate existieren als benötigt werden, könnte eine Ausstiegspolitik auch ohne Streichung von Berechtigungen Wirkung zeigen.

¹³ LULUCF-Emissionen sind in der EU-Gesetzgebung separat geregelt, jedoch innerhalb des Klima- und Energierahmens der EU 2030. Für weitere Informationen siehe EK 2018b.

¹⁴ Siehe ESR 2018

TABELLE 1: EUROPÄISCHE ZIELE ZUR MINDERUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONEN

	Rechtliche Grundlagen	Basisjahr	2016 (historische Daten)	2020	2030	2040	2050
Gesamte Treibhausgasemissionen	EU 2050 Roadmap	1990	-24%	-20%	-40%	-60%	-80%
EU ETS	Richtlinie 2003/87/EC	2005	-26%	-21%	-43%	-67%	-90%
Lastenteilung	ESD 2009	2005	-11%	-10%	-30%	-	-
davon Deutschland	ESR 2018	2005	-4%	-14%	-38%	-	-

Quellen: EK 2011; ESD 2009; ESR 2018; EU ETS Richtlinie 2003/87/EC; Werte für 2016 aus EEA 2017a, 2017b.

2.2 Deutsche Klimaziele

Das erste nationale Klimaziel in Deutschland geht auf das Jahr 1990 zurück, als eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 25% bis zum Jahr 2005 angestrebt wurde.¹⁵ Dieses Ziel hat sich im Laufe der Jahre weiterentwickelt und wurde zuletzt im November 2016 im Klimaschutzplan 2050 bestätigt und festgelegt.¹⁶ Dieser legt Ziele für die Reduktion der Emissionen für 2020, 2030 und 2050 sowie sektorale Ziele für 2030 fest. Dabei handelt es sich um eine Absichtserklärung der vorherigen Bundesregierung, die rechtlich nicht verbindlich ist.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen nationalen und sektoralen Ziele sowie deren Zielerfüllung bis 2014. Zwei Aspekte sind hervorzuheben: Erstens müssen alle Sektoren einen wesentlichen Beitrag zu den nationalen Klimazielen leisten. Zweitens unterscheiden sich die sektoralen Ziele jedoch deutlich hinsichtlich der prozentualen Minderung der Treibhausgasemissionen.

TABELLE 2: NATIONALE KLIMAZIELE IN DEUTSCHLAND

	Basisjahr	2014	2020	2030	2050
Gesamt	1990	-28%	-40%	-55-56%	-80-95%
Energie	1990	-23%	-	-61-62%	-
Gebäude	1990	-43%	-	-66-67%	-
Verkehr	1990	-2%	-	-40-42%	-
Industrie	1990	-36%	-	-49-51%	-
Landwirtschaft	1990	-18%	-	-31-34%	-
Andere ¹⁷	1990	-69%	-	-87%	-

Quelle: BMU 2016.

¹⁵ Für eine Zusammenfassung der deutschen Klimaziele siehe bpb 2013.

¹⁶ Siehe BMU 2016

¹⁷ Unter anderem, Abfallwirtschaft, Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft.

Obwohl das Gesamtziel für den Verkehrssektor vergleichsweise niedrig ist, wurden hier seit 1990 die Emissionen nicht wesentlich reduziert. Auch im Energiesektor erfolgte im Vergleich eine geringe Treibhausgasminderung. Der Energie- und der Verkehrssektor müssen daher in den kommenden Jahren eine überproportionale Reduzierung erreichen. Zwischen 1990 und 2014 haben der Gebäude- und Industriesektor ihre Emissionen deutlich reduziert. Das vorgegebene Ziel für die weitere Reduzierung ist damit relativ niedrig.

Der Koalitionsvertrag der Großen Koalition zwischen CDU, CSU und SPD bekennt sich zu allen nationalen und europäischen Klimazielen. Der Vertrag räumt jedoch eine Handlungslücke mit Hinblick auf das nationale Ziel von 2020 ein. Das 2030-Ziel soll hingegen auf jeden Fall erreicht werden und 2019 als Gesetz verabschiedet werden. Darüber hinaus wird eine Kommission für "Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung" eingesetzt, die einen Ausstiegsplan für die Kohleverstromung einschließlich eines Termins für die Beendigung ausarbeiten soll.¹⁸

2.3 Ineffizienzen und Wechselwirkungen paralleler Klimaziele

Parallele Klimaziele auf verschiedenen Ebenen (europäisch vs. national) oder für verschiedene Sektoren (EU ETS vs. Lastenteilung, Verkehr vs. Industrie) interagieren; sie können teilweise in Konflikt stehen und Ineffizienzen verursachen. Wechselwirkungen können gemildert werden, wenn ein hohes Maß an Flexibilität gewährleistet ist. Für die EU ETS-Sektoren können zusätzliche nationale Ziele zu einer Abweichung von der effizienten Verteilung der Minderung innerhalb Europas führen: Emissionen werden einfach in ein anderes Land verlagert, ohne eine zusätzliche Minderung zu erreichen (hier ohne die zusätzliche Löschung von Zertifikaten) oder/und Minderungsoptionen mit geringeren Kosten in anderen Ländern könnten nicht in Anspruch genommen werden. Die Gesamtkosten der Minderung könnten aus europäischer Sicht folglich steigen. Nationale Maßnahmen in den EU ETS-Sektoren sind nur dann wirksam, wenn sie mit einer Löschung von Zertifikaten einhergehen. In diesem Fall könnte aus wirtschaftlicher Sicht eine reine Löschung von Zertifikaten, ohne nationale Maßnahmen, die bessere Option sein. Die Streichung würde die Emissionsobergrenze senken und die Verringerung würde in dem Land und dem Sektor mit den geringsten Kosten erfolgen.

Für Nicht-EU ETS-Sektoren ist die anfängliche Verteilung der Verpflichtungen gemäß der Lastenteilung nicht kosteneffizient. Nationale Lastenteilungsziele werden nach Wirtschaftsleistung und damit letztlich nach Fairnessaspekten festgelegt. Die Verordnung sieht jedoch Mechanismen für eine flexible Zielerreichung vor. Ein zentrales Element ist die Möglichkeit, Zertifikate zwischen den Ländern zu handeln. Außerdem ermöglicht das Lastenteilungssystem eine gewisse zeitliche Flexibilität bei der Zielerreichung. Darüber hinaus können Maßnahmen betreffend LULUCF sowie gelöschte EU ETS-Zertifikate als Gutschrift für die Ziele der Lastenteilung angerechnet werden.¹⁹

¹⁸ Siehe CDU/CSU/SPD 2018

¹⁹ Die deutschen Ziele des Klimaschutzplans 2050 sind im Vergleich zu den europäischen Zielen ambitionierter. Dies bedeutet, dass Deutschland entweder anteilmäßig mehr Emissionen in den EU ETS-Sektoren reduziert (was, wie beschrieben, ineffizient sein kann) oder stärker in den Nicht-EU ETS-Sektoren mindert.

Eine weitere Frage mit Konfliktpotenzial ist, welches Land für Treibhausgasemissionen verantwortlich gemacht wird, wenn in einem Land emittiert werden, das produzierte Gut aber in einem anderen verbraucht wird ("Carbon Liability"). Obwohl Carbon Liability im Kern eine reine Frage der Bilanzierung ist, kann sie von Bedeutung dafür sein, ob ein Land seine nationalen Klimaziele erreicht oder nicht. Wenn Deutschland beispielsweise chinesischen Stahl importiert, werden die verursachten Treibhausgasemissionen - nach der derzeitigen Regelung - China zugerechnet, obwohl der Stahl für den deutschen Verbrauch produziert wurde. Die europäische und nationale CO₂-Bilanzierung basiert auf diesem Quellprinzip und bilanziert die Emissionen nicht auf Seiten des Verursachers. Der Hauptgrund liegt darin, dass die Daten über die Emissionen aus Produktionsprozessen leichter zu erhalten sind als die Daten für eine Bilanzierung der Emissionen auf Seiten der Verursacher. Im Grunde hat Deutschland zur Erreichung seines nationalen Klimaziels somit einen Anreiz Strom aus polnischen Kohlekraftwerken zu importieren, da diese Stromimporte ebenfalls gemäß des Quellprinzips bilanziert werden.

Die Frage der Carbon Liability ergibt sich auch im Zusammenhang mit klimafreundlichem synthetischem Methan und Kraftstoffen aus Power-to-X-Technologien (PtX). Ein Beispiel ist die derzeit viel diskutierte Möglichkeit, synthetische Kraftstoffe aus Nordafrika zu importieren, wo Solarstrom zu relativ geringen Kosten erzeugt werden könnte.²⁰ Dabei wird CO₂ als Input für die PtX-Produktion verwendet, so dass der Prozess negative Emissionen verursacht. Dem Grundsatz des Quellprinzips zufolge werden die Verbraucher von synthetischem Methan und Kraftstoffen für die gleichen Emissionen verantwortlich gemacht, als ob sie konventionelle fossile Brennstoffe verwendet hätten. Die Verbrennung synthetischer Energieträger verursacht die gleichen Emissionen wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Um einen Anreiz für die Nutzung von PtX-Technologien zu schaffen, sollte die Entwicklung dieser Technologie begleitet werden von Mechanismen, die den Handel mit Gutschriften für negative Emissionen ermöglichen.

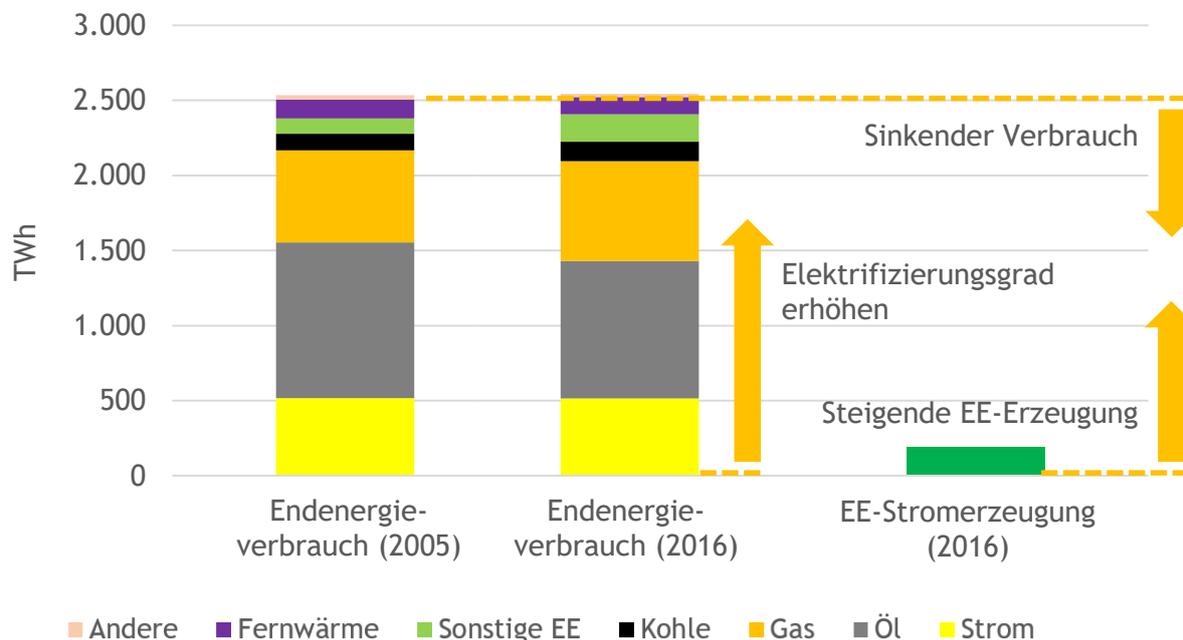
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es Wechselwirkungen und Ineffizienzen gibt, die durch das Zusammenspiel von parallelen Klimazielen auf verschiedenen Ebenen und für verschiedene Sektoren verursacht werden und gelöst werden müssen. Da der Klimawandel eine globale Herausforderung darstellt, sollte der Schwerpunkt auf der Reduzierung der globalen Treibhausgasemissionen liegen. Dies sollte so effizient wie möglich zu minimalen Vermeidungskosten erfolgen. Die beste Möglichkeit, Konflikte zu reduzieren und die Kosteneffizienz zu steigern, ist ein hohes Maß an Flexibilität in Bezug auf die Erreichung der Minderung. Institutionalisierte Mechanismen sollten die Nutzung von Flexibilitätsoptionen unterstützen. Die EU-Klimastrategien und -ziele spiegeln bereits ein entsprechendes Bewusstsein wider. Sowohl das EU ETS als auch die Lastenteilung legen Gesamtziele fest, ermöglichen aber Flexibilität. Deutsche Ziele sollten dieses Erkenntnis aufnehmen und in dieses Flexibilitätsgefüge eingebettet sein.

²⁰ Siehe beispielsweise: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics 2018.

3 STRATEGIEN ZUR ERREICHUNG DER KLIMAZIELE

Dieses Kapitel analysiert zentrale Bestandteile von Strategien zur Erreichung der in Kapitel 2 diskutierten Klimaziele. Zunächst werden historische Entwicklungen und konkrete Ziele dargestellt. Im zweiten Schritt analysieren wir, wie wichtige aktuelle Studien die verschiedenen Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen abbilden und ordnen die angenommenen Entwicklungen im Verhältnis zum historischen Trend ein. Drittens werden Barrieren und Probleme, welche die Realisierung der angestrebten Ziele gefährden, diskutiert.

Die wichtigsten aktuell diskutierten Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen sind in Abbildung 1 dargestellt. Angesichts des historischen Endenergieverbrauchs in Deutschland (hier dargestellt für 2005 und 2016) und der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (hier für 2016) lassen sich drei grundlegende Maßnahmen identifizieren.²¹ Erstens, da der Verbrauch fossiler Brennstoffe in direktem Zusammenhang mit Emissionen steht, könnte der Energieverbrauch gesenkt werden. Zweitens reduziert die Elektrifizierung des Endenergiebedarfs - entweder direkt (z. B. E-Mobilität oder Wärmepumpen) oder indirekt (synthetische Kraftstoffe) - die Emissionsintensität des Energieverbrauchs. Dies trifft zu, wenn drittens die Emissionsintensität der Stromerzeugung gering ist - in Deutschland wird dies durch den Ausbau erneuerbarer Energien erreicht.



* Biomasse, Abfall, Geothermie und Solarthermie

ABBILDUNG 1: ENDENERGIEVERBRAUCH UND STRATEGIEN ZUR ERREICHUNG DER KLIMAZIELE

Quelle: AGEB 2017.

²¹ Andere Komponenten wie eine Steigerung der Anteile aus Biomasse und Biokraftstoffen werden nicht im Detail diskutiert, da das Potenzial für die Ausweitung der energetischen Nutzung als begrenzt angesehen wird. Während einige Studien den derzeitigen Verbrauch von rund 300 TWh (inklusive Importe) als konstant ansehen (ewi ER&S 2017), gehen andere von einem Anstieg auf 350 TWh (BCG & Prognos 2018) oder 400 TWh (Fraunhofer ISI et al. 2017) bis 2050 aus.

Wir vergleichen drei aktuelle Studien, die integrierte Energiemarktszenarien untersuchen. Dabei konzentrieren wir uns darauf, wie die oben genannten Strategien in den Studien abgebildet werden. Insbesondere sind wir daran interessiert, kritische Annahmen zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die Studienergebnisse zu ermitteln. Die Studien wurden ausgewählt, da sie ein breites Spektrum beteiligter Interessenvertreter²² abdecken und somit ein großes öffentliches Interesse erfahren haben. Berücksichtigte Studien sind:

- Fraunhofer ISI et al. 2017 - Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland
- BCG & Prognos 2018 - Klimapfade für Deutschland
- dena 2017a - Zwischenfazit dena-Leitstudie Integrierte Energiewende²³

Alle Studien verfolgen einen ähnlichen Ansatz: Zunächst wird ein Referenzszenario vorgestellt, das einem Weiter-wie-bisher-Szenario auf Basis der aktuellen Marktbedingungen und Klimaschutzmaßnahmen entspricht. Diese Szenarien stellen explorative Szenarien dar, da z. B. die Reduzierung der Treibhausgasemissionen bzw. die Erreichung der Klimaziele nicht per Annahme vorgegeben ist, sondern ein Modellergebnis basierend auf einer Fortschreibung aktueller Klimaschutzpolitik darstellt. Folglich unterscheiden sich alle Referenzszenarien hinsichtlich der Treibhausgasemissionen: Während BCG & Prognos 2018 und dena 2017a bis 2050 (2030) von einer ähnlichen Reduktion um rund -60% (-44%) ausgehen, erwarten Fraunhofer ISI et al. 2017 nur -56% im Jahr 2050 (-43% im Jahr 2030). Die Fortschreibung des historischen Trends von 2005 bis 2015 zeigt, dass selbst die Referenzszenarien von einer Beschleunigung der Treibhausgaseminderung ausgehen, da die Fortschreibung im Jahr 2050 (2030) nur zu einer Reduktion von -47% (-36%) führt.

Im Anschluss an die Referenzszenarien werden in allen Studien verschiedene normative Szenarien vorgestellt. Diese beschreiben, wie Klimaziele (in der Regel durch Kostenminimierung) erreicht werden können. In unserer Analyse konzentrieren wir uns auf das Hauptszenario jeder Studie mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um jeweils 80% bis 2050. Wir sind besonders daran interessiert, wie die Szenarien Minderungsoptionen berücksichtigen, welche impliziten und expliziten Annahmen getroffen werden, wie sich diese im Vergleich mit dem historischen Trend verhalten und welche Barrieren bei der Umsetzung der Strategien bestehen können. Der Vergleich basiert auf öffentlich zugänglichen Daten, die sich hinsichtlich des Detaillierungsgrades und der Vollständigkeit unterscheiden. Dennoch lassen sich wesentliche Unterschiede gut erkennen.

Da die beiden Strategien der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Elektrifizierung des Endenergiebedarfs eng miteinander verbunden sind (elektrische Anwendungen sind in der Regel effizienter als die Verwendung konventioneller fossiler Brennstoffe), werden sie im folgenden Abschnitt gemeinsam behandelt. Anschließend erfolgt eine Diskussion über den verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien im Strombereich.

²² BCG & Prognos 2018 wurde vom BDI, dem Interessenverband der deutschen Industrie, beauftragt; die dena 2017a brachte mehr als 50 Stakeholder von Einzelunternehmen bis hin zu Lobbygruppen zusammen; Fraunhofer ISI et al. 2017 wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) beauftragt.

²³ ewi ER&S ist leitender Berater in diesem Projekt. Teile der Analyse beziehen sich auf dena 2017b, die auf den gleichen Annahmen und Szenarien basiert.

3.1 Energieverbrauch reduzieren und Elektrifizierungsgrad erhöhen

Ein wichtiger Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist die Senkung des Energieverbrauchs. Dies kann auf zwei Arten erreicht werden: Suffizienz und Effizienz.

Die Suffizienz konzentriert sich darauf, dass die Verbraucher ihre Nachfrage nach Ressourcen reduzieren. Ein angemessener Konsum kann das Ergebnis ethischer Überlegungen sein oder durch einen geeigneten politischen Rahmen gefördert werden. So kann beispielsweise die Verringerung der Nachfrage nach privaten Verkehrsmitteln zugunsten des öffentlichen Verkehrs - sei es durch steigende private Transportkosten oder veränderte Verbraucherpräferenzen - die Energienachfrage senken. Das Konzept der Suffizienz ist Gegenstand kontroverser öffentlicher Diskussionen, da es dem politischen Ziel eines kontinuierlichen Wirtschafts- und Wohlstandswachstums potentiell entgegensteht und die Freiheit individueller Konsumentenentscheidungen beeinträchtigen könnte. Die Befürworter des Suffizienzargumentes führen an, dass ohne eine Steigerung der Sparsamkeit die Klimaziele nicht erreicht werden, da Reboundeffekte den Anstrengungen zur Senkung des Energieverbrauchs entgegenwirken könnten. Kritiker in der Suffizienz-Debatte argumentieren dagegen, dass kontinuierliches Wachstum durch Effizienzsteigerung und erneuerbare Energien mit der Erreichung der Klimaziele vereinbar ist.²⁴

Der zweite Ansatz zur Senkung des Energieverbrauchs ist die Steigerung der Energieeffizienz, d.h. die Verringerung des Energiebedarfs für eine bestimmte Energiedienstleistung.²⁵ Tabelle 3 zeigt das deutsche Primärenergieverbrauchsziel für 2050 und den aktuellen Grad der Zielerreichung.

TABELLE 3: ÜBERBLICK ÜBER DEUTSCHE ENERGIEEFFIZIENZZIELE UND GRAD DER ZIELERREICHUNG

		Basisjahr	Historisch	Ziel 2050
Primärenergieverbrauch	2008	Minderung ggü. 2008	-6% (2017)	-50%
		Jährliche Minderung	-0.7% p.a. (2008-2017)	-1.9% p.a. (2018-2050)

Quellen: BMWi 2015; AGEB 2017; eigene Berechnung.

Das angestrebte Ziel für die Reduktion des Primärenergieverbrauchs beträgt 50% bis 2050 gegenüber 2008. Bis 2017 wurde lediglich eine Reduktion von ca. 6% erreicht, dies entspricht einer durchschnittlichen Reduktion von 0,7% p.a. Um das Ziel im Jahr 2050 zu erreichen, müsste der Verbrauch bis 2050 zukünftig um durchschnittlich 1,9% p.a. sinken. Für den Primärenergieverbrauch wurde weiterhin ein Ziel für 2020 festgelegt, eine Reduktion von 20% gegenüber 2008. Bei dem derzeitigen Niveau wäre jedoch eine unrealistisch hohe Reduktionsrate von 5,3% p.a. notwendig, um dieses Ziel zu erreichen.

²⁴ Siehe Linz 2015

²⁵ Die Ziele orientieren sich an der 2012 veröffentlichten EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED). Die EED wurde herausgegeben, um das europäische Energieeffizienzziel der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs bis 2020 um 20% gegenüber 2005, zu erreichen. Eines der Schlüsselemente ist die Verpflichtung der Mitgliedstaaten, den Energieverbrauch von 2014 bis 2020 um durchschnittlich 1,5% p.a. zu senken.

Um ein besseres Verständnis zu entwickeln, warum das Ziel verfehlt wird, werfen wir einen genaueren Blick auf zwei Beispiele aus dem Verkehrs- und Gebäudesektor (siehe Tabelle 4).

TABELLE 4: DEUTSCHE ENERGIEEFFIZIENZZIELE IM VERKEHRS- UND GEBÄUDESEKTOR

Basisjahr		Historisch	Ziel 2050
Endenergieverbrauch im Verkehrssektor	2005	Minderung ggü. 2005	+ 4.2% (2016)
		Jahresdurchschnitt	+0.4% p.a. (2005-2016)
Primärenergieverbrauch im Gebäudesektor	2008	Minderung ggü. 2008	- 14.8% (2014)
		Jahresdurchschnitt	-2.6% p.a. (2008-2014)
			- 40%
			-1.6% p.a. (2017-2050)
			- 80%
			-3.9% p.a. (2015-2050)

Quellen: BMWi 2015; AGEb 2017; eigene Berechnung.

Im Verkehrssektor soll der Endenergieverbrauch um -40% (-10%) bis 2050 (2020) gegenüber 2005 sinken, doch bis 2016 ist der Endenergieverbrauch sogar um 4,2% gestiegen. Das Ziel für 2020 - eine Reduktion von 10% gegenüber 2005 - scheint damit bereits jetzt unerreichbar. Um das Ziel noch zu erreichen, wäre eine Reduzierung um 3,6% p.a. erforderlich. Obwohl die Energieeffizienz (d. h. der Endenergieverbrauch pro Transportkilometer) mit +10% deutlich gestiegen ist, wurde dies durch einen Anstieg der Gesamtverkehrsleistung um +16% überkompensiert. Speziell der Verkehrssektor zeigt die Wichtigkeit, zukünftige Nachfrageentwicklungen richtig einzuschätzen, da unrealistische Annahmen die Ergebnisse beeinträchtigen können.²⁶

Ein weiteres Effizienzziel konzentriert sich auf den Primärenergieverbrauch des Gebäudesektors. Ziel ist es, den Verbrauch bis 2050 gegenüber 2008 um 80% zu senken. Zwischen 2008 und 2014 ist der Verbrauch um durchschnittlich 2,6% p.a. gesunken. Um das Ziel bis 2050 zu erreichen, wäre zukünftig jedoch eine deutlich höhere Verbrauchssenkung von 3,9% p.a. notwendig. Obwohl in den letzten Jahren (2008 bis 2016) die Energieeffizienz (d. h. der Endenergieverbrauch pro Quadratmeter) mit +18% deutlich gestiegen ist, wurde dies teilweise durch einen Anstieg der Gesamtwohnfläche um 14% - bedingt durch eine Zunahme von Single-Haushalten - kompensiert.²⁷ Ein wichtiger Faktor für die weitere Senkung des Energieverbrauchs, insbesondere des Endenergieverbrauchs pro Quadratmeter, ist die Erhöhung der Gebäudesanierungsrate. Diese bezieht sich hier i.d.R. auf die energetische Modernisierung der Gebäudehülle sowie der Heizungsanlagen.²⁸ Trotz verschiedener politischer Versuche stagniert die Quote in den letzten Jahren zwischen 0,8% und 1% pro Jahr.

Da eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Stromsektor billiger sein kann als in anderen Sektoren, ist der zweite wichtige Mechanismus zur Erreichung der Klimaziele die Elektrifizierung

²⁶ Eigene Berechnungen basierend auf AGEb 2017.

²⁷ Eigene Berechnungen basierend auf AGEb 2017.

²⁸ Oftmals sind beide Arten von Maßnahmen voneinander abhängig, z. B. erfordert die Installation von Wärmepumpen einen hohen Dämmungsgrad der Gebäudehülle, um kosteneffizient zu sein (dena 2017b).

des Endenergieverbrauchs. Dies kann auf zwei Arten geschehen: Zum einen durch direkte Elektrifizierung mit z. B. elektrischen Wärmepumpen oder Elektrofahrzeugen.²⁹ Da Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen effizienter sind als Verbrennungsmotoren oder Gasheizungen, sinkt auch der Endenergieverbrauch in den jeweiligen Sektoren.³⁰ Zweitens können fossile Brennstoffe indirekt durch synthetische Brennstoffe ersetzt werden, die durch strombasierte PtX-Verfahren erzeugt werden (z. B. Power-to-Gas oder Power-to-Fuel).³¹

Referenzstudien

Alle oben vorgestellten Studien betonen die Bedeutung einer Senkung des Energieverbrauchs im Gebäudesektor. Der Hauptindikator für die Steigerung der Energieeffizienz ist die Gebäudesanierungsrate. Aufgrund der unterschiedlichen Sanierungsintensität, der eingesetzten Heiztechnologien und sonstiger abweichender Annahmen sind die verfügbaren Daten jedoch nur begrenzt vergleichbar. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Gebäudesanierungsraten.

TABELLE 5: ÜBERBLICK ÜBER GEBÄUDESANIERUNGSRATEN

	dena 2017a	BCG & Prognos 2018	Fraunhofer ISI et al. 2017 ³²
Aktuelle Rate		ca. 1% p.a.	
80% Szenario	1,4% p.a. (2015 - 2050)	1,7% p.a. (2015 - 2050)	1,1% p.a. (2015) linearer Anstieg auf 2,5% p.a. (2050)

Quellen: Fraunhofer ISI et al. 2017; dena 2017a; BCG & Prognos 2018.

Im 80%-Szenario geht dena 2017a von einer konstanten Sanierungsrate von 1,4% p.a. aus. BCG & Prognos 2018 geht von einer Rate von 1,7% aus. Fraunhofer ISI et al. 2017 hingegen gehen nicht von einer konstanten Rate aus, stattdessen wird ein linearer Anstieg bis 2050 angenommen: Während der Ausgangswert im Jahr 2015 etwa der aktuellen Rate entspricht, steigt die Gebäudesanierungsrate bis 2050 auf 2,5% p.a. im 80%-Szenario.

Neben einer besseren Isolierung gehen alle Studien von einer signifikanten Zunahme der Verbreitung elektrischer Wärmepumpen aus, die durch die zugrunde liegenden Annahmen zum technologischen Fortschritt und zur Kostenreduzierung getrieben wird (siehe Tabelle 6). BCG & Prognos 2018 gehen von einem Anstieg auf 14 Millionen Wärmepumpen im Jahr 2050 aus. Auch Fraunhofer ISI et al. 2017 sowie dena 2017a gehen, wenn auch moderater, von einem deutlichen Anstieg aus.

²⁹ Siehe Fraunhofer ISI et al. 2017

³⁰ Die Auswirkung auf den gesamten (Primär-)Energieverbrauch und vor allem die Treibhausgasreduktion wird durch die Stromquelle bestimmt. Während die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien emissionsfrei ist und der Umwandlungswirkungsgrad 100% beträgt, ist die Nutzung der kohlebasierten Stromerzeugung letztlich eine Übertragung von Emissionen und Wirkungsgradverlusten in den Stromsektor.

³¹ Siehe ewi ER&S 2017 und dena 2017a

³² Eigene Schätzung des Durchschnittswertes, da die Raten für verschiedene Gebäudetypen separat angezeigt werden.

Im Bereich synthetische PtX-Brennstoffe geht nur dena 2017a davon aus, dass diese nach 2030 wirtschaftlich werden. Aufgrund des signifikanten Einsatzes von PtX-Brennstoffen (242 TWh im Jahr 2050) wird in dieser Studie zudem die Bedeutung der bestehenden Infrastrukturen für Fernwärme und Erdgas hervorgehoben.

TABELLE 6: ÜBERBLICK ÜBER DEN ELEKTRIFIZIERUNGSGRAD

				2017		dena 2017a		BCG & Prognos 2018		Fraunhofer ISI et al. 2017	
				2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Indirekte Elektrifizierung	PtX Brennstoffe	TWh	✗	✗	242 TWh ✓	✗	✗	✗	✗		
Direkte Elektrifizierung	Wärmepumpen	Millionen	0,8	3,4	6,5	na	14	na	na		
		TWh	na	na	na	29 TWh	51 TWh	18 TWh	29 TWh		
	E-Mobilität (BEV+PHEV)*	Millionen	0,2 Mio.	Zunehmend (Details nicht verfügbar)	6	26	6	30			
		TWh	na		18 TWh	70 TWh	12 TWh	68 TWh			

* BEV = Battery electric vehicle (Batterieelektrische Fahrzeuge); PHEV = Plug-in hybrid electric vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeuge)

Quellen: BWP 2017; KBA 2017b; Fraunhofer ISI et al. 2017; dena 2017a; BCG & Prognos 2018.

Im Verkehrssektor ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen einer der wichtigsten Hebel zur Reduzierung des Energieverbrauchs und damit der Treibhausgasemissionen. BCG & Prognos 2018 und Fraunhofer ISI et al. 2017 gehen von einer vergleichbaren Verbreitung der Elektromobilität mit bis zu 30 (6) Millionen Fahrzeugen (BEV und PHEV) im Jahr 2050 (2030) aus. Angesichts der Neuzulassungen von 55.000 Fahrzeugen im Jahr 2017 (ein Anteil der Elektroautos von 1,6%) erfordert dies einen deutlichen Anstieg.³³ BCG & Prognos 2018 gehen davon aus, dass der Anteil der Elektroautos an den Neuzulassungen bis 2020 auf rund 6% und bis 2030 auf 42% steigen wird. dena 2017a betont ebenfalls die Bedeutung der Elektromobilität, weist aber gleichzeitig auf den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen hin.

Kritische Einschätzung

Im Gebäudesektor gehen alle Studien von einem deutlichen Anstieg der Sanierungsraten aus. Vor dem Hintergrund der historischen Entwicklung erscheint diese Annahme optimistisch. Obwohl in der Vergangenheit mehrfach versucht wurde, die Sanierungsrate zu erhöhen, hatten alle Maßnahmen nur eine sehr begrenzte Wirkung.³⁴ Dennoch gehen alle Studien von deutlich höheren Raten als dem aktuellen Wert von 1% p.a. aus, um das nationale Klimaziel einer Treibhausgasreduzierung von 80% zu erreichen.

³³ Siehe KBA 2017a

³⁴ Siehe dena 2017b

Die Sanierungsrate hängt nicht nur von den Kosten und wirtschaftlichen Anreizen ab: Viele Gebäudesanierungsmaßnahmen sind - schon heute - langfristig rentabel. Steigende Kosten für Gas und Strom könnten diese Tendenz noch verstärken. Hohe Investitionskosten und lange Amortisationszeiten verhindern jedoch teilweise die Maßnahmenumsetzung.³⁵ Hinzu kommen nicht-monetäre Faktoren wie das Mieter- Vermieter-Dilemma³⁶ und Akzeptanzprobleme bei Mietsteigerungen oder Baulärm.

Ein weiterer Faktor, der einen sinkenden Gesamtenergieverbrauch verhindern könnte, ist der sogenannte Reboundeffekt.³⁷ Demnach sinkt der Energieverbrauch durch Steigerungen der Energieeffizienz oft nicht proportional. Beispiele für diesen Effekt sind der beobachtete Anstieg der Raumtemperatur nach dem Austausch ineffizienter Heizsysteme sowie die Erhöhung der jährlichen Gesamtfahrleistung (oder die Anschaffung größerer Fahrzeuge wie SUVs und Limousinen)³⁸ als Reaktion auf eine höhere Kraftstoffeffizienz der Fahrzeuge. Die genannten Fälle beschreiben direkte Veränderungen im Konsumverhalten und werden als direkter Reboundeffekt bezeichnet. Darüber hinaus ermöglichen sinkende Kraftstoff- oder Heizkosten den Verbrauchern, mehr für energieintensive Aktivitäten (wie Flugreisen) oder den Kauf anderer Produkte und Dienstleistungen auszugeben. Dieser indirekte Anstieg des Ressourcenverbrauchs wird als indirekter Reboundeffekt bezeichnet. Obwohl die Folgen des Reboundeffektes bekannt sind, finden sie in der politischen Diskussion wenig Beachtung und werden in der Regel in Studien nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Elektrifizierung des Verkehrssektors prognostizieren die betrachteten Studien eine deutliche Zunahme der Elektrofahrzeuge. Selbst wenn kostenbedingte Hemmnisse gegenüber herkömmlichen Motoren und mögliche Rohstoffknappheit durch erhöhte Batterieproduktion außer Acht gelassen werden, könnte die Verbreitung von Elektrofahrzeugen durch nicht-monetäre Präferenzen gehemmt werden: Faktoren wie die begrenzte Reichweite, langsames Aufladen und mangelnde Tankstelleninfrastruktur begünstigen nach wie vor Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotoren. Technologische Fortschritte in der Batterietechnologie können sich als entscheidend erweisen, sind aber noch ungewiss.

Auch die derzeitige Struktur des Steuern- Abgaben- und Umlagensystems könnte eine Elektrifizierung von Energieanwendungen behindern: Während Steuern und Abgaben, also staatlich induzierte Preisbestandteile, die nicht direkt mit Produktion und Vertrieb zusammenhängen, etwa ein Viertel des Gaspreises für Haushalte ausmachen, beträgt der Aufschlag auf den Strompreis mehr als 50%.³⁹ Dieses Ungleichgewicht wird in der Regel nicht in Energiemarktstudien berücksichtigt, hat aber erhebliche Auswirkungen auf individuelle Technologieentscheidungen. Angesichts des komplexen Systems von Steuern und Abgaben für jeden Energieträger und Verbrauchertyp und

³⁵ Gerade für Hausbesitzer wie Rentner und ältere Menschen ist dies oft eine große Hürde.

³⁶ Während die Kosten der Sanierung vom Vermieter getragen werden, profitiert der Mieter von niedrigeren Energiekosten. Der Anreiz des Vermieters, eine wirtschaftlich effiziente Sanierung durchzuführen, ist von der Möglichkeit der Kostenweitergabe auf den Mieter abhängig.

³⁷ Siehe UBA 2014

³⁸ Siehe Aral 2017

³⁹ Siehe BDEW 2017a und BDEW 2017b

damit der komplexen Verteilungswirkungen einer möglichen Umstrukturierung sind die politischen Hürden zur Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen für alle Energieträger erheblich.

Die Elektrifizierung des Endenergiebedarfs stellt einige Herausforderungen an die Versorgungssicherheit: In Abhängigkeit des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen und des Heizprofils für Power-to-Heat (PtH) können Nachfragespitzen auftreten, die eine signifikante Reservekapazität erfordern, um Nachfrage und Angebot zuverlässig auszugleichen.

Auch das Stromnetz wird mit zunehmender Elektrifizierung vor große Herausforderungen gestellt. Die in vielen Studien angenommene starke Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen könnte den Netzausbaubedarf erhöhen. Dies würde einen hohen Finanzierungsbedarf, Kostensteigerungen für Verbraucher sowie einen erheblichen baulichen Aufwand bedeuten. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit öffentlichen Widerständen bei Infrastrukturprojekten und Verzögerungen in der Vergangenheit, könnte sich das Stromnetz als kritische Hürde für eine flächendeckende Elektrifizierung erweisen.

Der Einsatz von PtX-Brennstoffen könnte den Ausbaubedarf der Netzinfrastuktur sowie die zu deckende Spitzenlast teilweise reduzieren: PtX-Brennstoffe nutzen die vorhandene Infrastruktur und können leichter gelagert werden. Auch bestehende industrielle Prozessrouten und Technologien auf Basis fossiler Brennstoffe können leichter auf synthetische Brennstoffe umgestellt werden. Allerdings ist die PtX-Technologie derzeit nicht wirtschaftlich und signifikante Kostensenkungen sind notwendig. Darüber hinaus sollte der bei der Herstellung von synthetischen Brennstoffen eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energien stammen. In Deutschland stellt die geringe Flächenverfügbarkeit für erneuerbare Energien eine Hürde für die signifikante Produktion von PtX-Brennstoffen aus EE-Strom dar. Die PtX-Erzeugung ist eher in sonnigen Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte, wie z. B. Nordafrika oder Saudi-Arabien, kosteneffizient. In Europa bieten zum Beispiel auch Offshore-Windparks in Nordeuropa geeignete Standorte für die PtX-Herstellung.⁴⁰ Daher wäre der Einsatz von PtX wahrscheinlich mit erheblichen Energieimporten verbunden.

⁴⁰ Siehe ewi ER&S 2017

3.2 Ausbau der EE-Stromerzeugung

Damit die Elektrifizierung des Energiebedarfs (wie im vorherigen Abschnitt beschrieben) zu einer Reduzierung von Treibhausgasemissionen führt, muss die Emissionsintensität der Stromerzeugung verringert werden. Da der Einsatz von Kernkraftwerken in Deutschland aufgrund einer ablehnenden öffentlichen Haltung in Zukunft nicht mehr möglich sein wird, sind erneuerbare Energien die bevorzugte Option.⁴¹

Seit der Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2000 stieg der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung (vor allem durch das Wachstum bei Wind- und Solarenergie) schnell an.⁴² Im Jahr 2016 betrug er 32% an der Bruttostromnachfrage.⁴³ Das übergeordnete Ziel ist es, im Jahr 2050 einen Anteil von 80% erneuerbarer Energien an der Bruttostromnachfrage zu erreichen, einschließlich eines Zwischenziels von 65% im Jahr 2030, wie im jüngsten Koalitionsvertrag festgelegt (vorausgesetzt, der Ausbau des Stromnetzes schreitet planmäßig voran).⁴⁴ Für den Anteil der EE-Stromerzeugung liegt das Zwischenziel für 2020 bei 35%. Dies wird voraussichtlich erreicht oder sogar übertroffen.

Referenzstudien

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der EE-Stromerzeugung aus Sonne (links) und Wind (rechts) in den Referenzstudien. Alle drei Studien gehen von einem starken Anstieg aus.

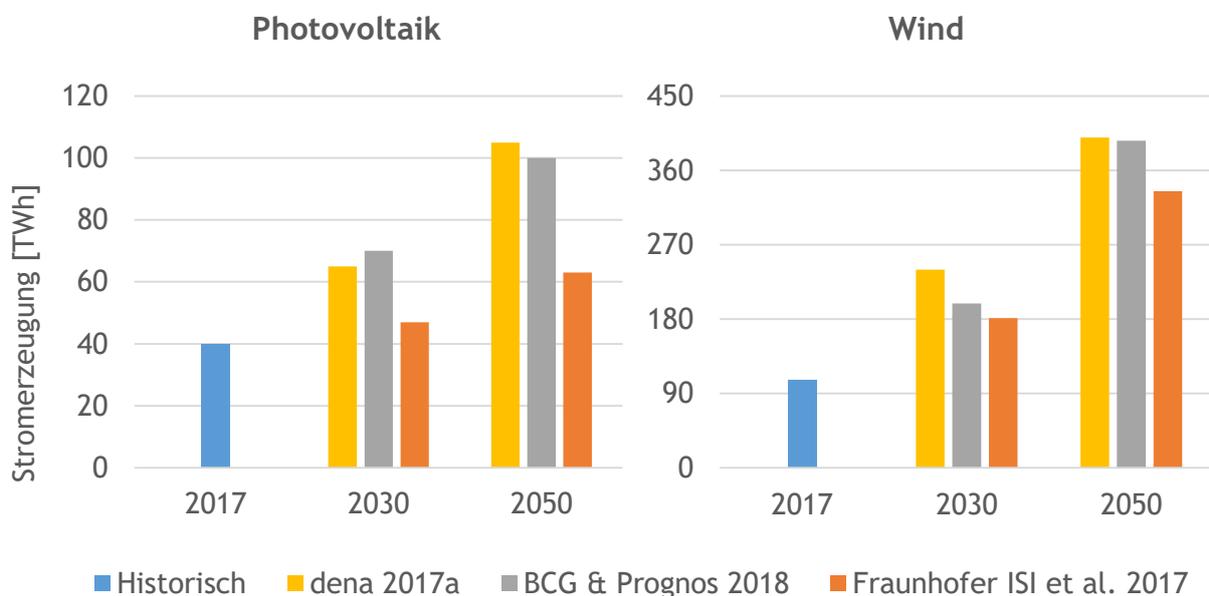


ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT STROMERZEUGUNG AUS ERNEUERBAREN ENERGIEN

Quellen: BMWi 2018; Fraunhofer ISI et al. 2017; Fraunhofer ISE 2018; dena 2017a und BCG & Prognos 2018.

⁴¹ Der Ersatz von Steinkohle- und Braunkohlekraftwerken durch Gaskraftwerke reduziert zusätzlich die Treibhausgasintensität der Erzeugung.

⁴² Siehe EEG 2017

⁴³ Siehe BMWi 2017

⁴⁴ Das Ziel ist Teil des Koalitionsvertrages zwischen SPD, CDU und CSU, allerdings gibt es noch keine Bezugsgröße für die festgelegte Prozentzahl (CDU/CSU/SPD 2018).

dena 2017a und BCG & Prognos 2018 gehen von einem starken Anstieg der Photovoltaik und windbasierten Erzeugung aus. Die Stromerzeugung aus Sonne soll sich bis 2050 nahezu verdreifachen. Der Anstieg der Windenergieerzeugung (Onshore und Offshore) wird noch höher eingeschätzt.

Fraunhofer ISI et al. 2017 gehen von einem geringeren Einsatz von Photovoltaik und Wind aus. Nettoimporte von 105 TWh kompensieren die fehlende Erzeugung im Jahr 2050. dena 2017a und BCG & Prognos 2018 gehen dagegen davon aus, dass Deutschland langfristig eine eher ausgeglichene Stromhandelsbilanz haben wird.

Kritische Einschätzung

Wie im vorherigen Abschnitt zur Elektrifizierung des Endenergiebedarfs diskutiert, ist die zunehmende Nutzung von Strom in den Endverbrauchssektoren mit großen Herausforderungen für die Stromnetze verbunden: Durch die zu erwartende Zunahme von Wärmepumpen und E-Mobilität dürften die Engpässe im Netz - insbesondere auf der Ebene der Verteilnetze - zunehmen.

Netzengpässe - insbesondere auf der Ebene der Übertragungsnetze - sind auch eine der größten Herausforderungen für den weiteren Ausbau dezentraler und volatiler EE-Erzeugungskapazitäten. In den letzten Jahren hat sich der Ausbau des Übertragungsnetzes immer wieder verzögert, was zu einem zunehmenden Defizit an Übertragungskapazitäten zwischen dem windreichen Norden Deutschlands und den Regionen mit hoher Stromnachfrage im Süden geführt hat.⁴⁵ Der weitere Ausbau der EE-Erzeugungskapazitäten kann die Netzengpässe weiter verstärken und einen beschleunigten Ausbau des Stromnetzes erforderlich machen. Aufgrund der Erfahrungen mit öffentlichem Widerstand bei Infrastrukturprojekten und den Verzögerungen in der Vergangenheit, könnte sich das Stromnetz als Engpass für den Ausbau der EE-Erzeugungskapazitäten erweisen.

Weiterhin wird eine geringe Akzeptanz für den Ausbau der EE-Stromerzeugung in den Studien nicht berücksichtigt. Insbesondere der starke Ausbau von Onshore-Windenergieanlagen kann auf Widerstand in der Bevölkerung stoßen. Onshore-Windparks haben nach jüngsten Umfragen die geringste Akzeptanz unter allen EE-Alternativen, insbesondere in der Nähe von Wohngebieten.⁴⁶ Dies ist vor allem auf die zunehmende Besorgnis über Schallemissionen und das optische Erscheinungsbild zurückzuführen. Diese Bedenken werden zunehmend in gesetzlichen Regelungen berücksichtigt, welche die Mindestabstände zu Wohngebieten erhöht oder die Nutzung von Waldflächen, z. B. in Bayern, einschränkt. Auch andere Bundesländer wie Nordrhein-Westfalen oder Schleswig-Holstein planen strengere Regelungen für den EE-Ausbau.

Weiterhin wird eine deutliche Zunahme flexibler Backup-Technologien wie offenen Gasturbinen und Stromspeichern wie Batterien erforderlich sein, um die Versorgungssicherheit in Zeiten geringer Wind- und Sonneneinstrahlung zu gewährleisten.

⁴⁵ Siehe Löschel et al. 2016

⁴⁶ Siehe Sonnberger & Ruddat 2016

4 EXPLORATIVE ERMITTLUNG DES ZUKÜNFTIGEN ENERGIEBEDARFS - EIN GEDANKENEXPERIMENT

Ausgehend von der historischen Entwicklung des Energiesystems und den beschriebenen Unsicherheiten bei der Realisierung der normativen Szenarien führen wir ein Gedankenexperiment durch. In einem vereinfachten Rahmen wollen wir die Folgen der Nichterreichung von wesentlichen Bestandteilen der deutschen Klimaschutzstrategie aufzeigen. Das Experiment ist als exploratives Szenario aufgebaut: Basierend auf einer Fortschreibung von historischen Daten zeigen wir eine denkbare zukünftige Entwicklung auf. Im Gegensatz zu den (wie im vorigen Kapitel dargestellten) normativen Szenarien werden Vorgaben, wie z. B. Treibhausgasemissionsgrenzen, nicht als bindende Ziele und Basis einer daraus resultierenden Systemarchitektur verstanden. Vielmehr sind Treibhausgasemissionen ein Ergebnis der fortgeschriebenen Entwicklung.⁴⁷

Im Folgenden konzentrieren wir unsere Analyse auf die Entwicklung des Energieverbrauchs. Im Besonderen konzentrieren wir uns auf die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs, da dieser die Treibhausgasemissionen direkt widerspiegelt. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die historische Entwicklung des Primärenergieverbrauchs sowie Szenarien für dessen Entwicklung bis 2050. Die Zusammensetzung des Energieverbrauchs in Bezug auf Energieträger basiert ab 2017 auf dem 80%-Szenario von Fraunhofer ISI et al. 2017 - vergleichbare Entwicklungen sind in BCG & Prognos 2018 und dena 2017a zu finden. Die Fortschreibung der Minderungsrate für den Primärenergieverbrauch zwischen 2005 und 2015 (orange Linie) sowie das Referenzszenario von Fraunhofer ISI et al. 2017 (dunkelgraue Linie) dienen als zusätzliche Bezugspunkte für die Analyse.

Die orange schraffierte Fläche stellt die mögliche Deckungslücke dar, berechnet als Differenz zwischen dem Primärenergieverbrauch im 80%-Szenario und den alternativen Verläufen. Die mögliche Deckungslücke könnte z. B. durch zusätzlichen (Prozess-)Wärmebedarf oder Kraftstoffverbrauch im Verkehrssektor entstehen. Die resultierende Deckungslücke zwischen dem 80%-Szenario und der Fortschreibung des historischen Trends liegt bei etwa 730 TWh im Jahr 2030 und 1.000 TWh im Jahr 2050. Unter der Annahme, dass der derzeitige Rückgang des Primärenergieverbrauchs zukünftig fortgeschrieben wird, liegt der Gesamtverbrauch im Jahr 2050 um 52% über dem im 80%-Szenario vorgesehenen Niveau.

⁴⁷ Siehe Dieckhoff et al. 2014 für mehr Details zur Gestaltung von Energieszenarien.

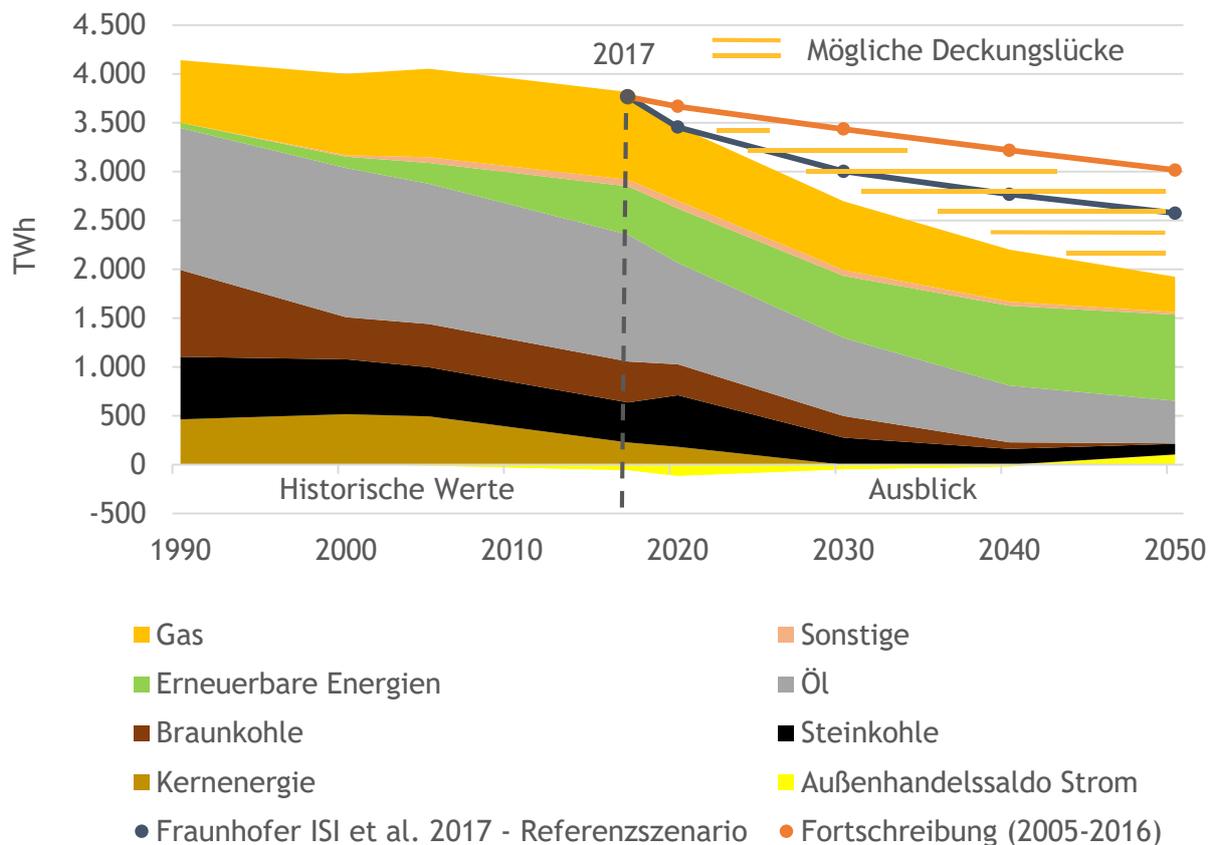


ABBILDUNG 3: PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH - HISTORISCHE ENTWICKLUNG UND AUSBLICK

Quellen: AGEB 2017a; Fraunhofer ISI et al. 2017; eigene Berechnungen.

Insbesondere für das Jahr 2030 ist angesichts der historischen Entwicklung und der begrenzten verbleibenden Zeit für regulatorische Eingriffe die angenommene Reduzierung des Primärenergiebedarfs im zielerreichenden Szenario fraglich. Für die weitere Analyse konzentrieren wir uns daher auf die mittelfristige Entwicklung bis 2030.

Annahmen des Gedankenexperiments

Wir leiten den potenziellen Primärenergiebedarf bis 2030 auf Basis der folgenden Annahmen ab: Erstens gehen wir von einem Gesamtprimärenergiebedarf aus, der auf der Fortschreibung des historischen Trends für den Primärenergieverbrauch zwischen 2005 und 2015 beruht. Zweitens nehmen wir an, dass die Deckungslücke in der Gesamtnachfrage durch einen proportionalen Anstieg des Primärenergieverbrauchs im Referenzszenario aus Fraunhofer ISI et al. 2017 geschlossen wird.⁴⁸ Die Anteile der Energieträger entsprechen also dem Referenzszenario, mit der Ausnahme, dass wir drittens von einer Braunkohle- und Kohleverstromung gemäß dem 80%-Szenario ausgehen. Die Lücke in der Stromerzeugung wird durch emissionsarme gasbefeuerte Stromerzeugung ausgeglichen. Dieses Szenario entspricht einer Entwicklung, bei der die umgesetzten Klimaschutzmaßnahmen in den Verbrauchssektoren teilweise nicht ausreichen, um sektorale Klimaziele zu erreichen. An der Reduzierung der Kohleverstromung wird jedoch festgehalten.

⁴⁸ Der proportionale Anstieg entspricht +5,1% im Jahr 2020 und +12,5% im Jahr 2030.

Abbildung 4 zeigt den resultierenden Primärenergiebedarf auf Basis der Annahmen des Gedankenexperiments. Eine Erreichung des nationalen Klimaziels im Jahr 2030, eine Senkung der Treibhausgasemissionen um 55% gegenüber 1990, würde hier verfehlt werden. Die resultierende Entwicklung würde stattdessen einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um ca. 40% entsprechen, was etwa dem nationalen Klimaziel für 2020 entspricht.⁴⁹ Dies bedeutet auch, dass Deutschland seine Ziele im Rahmen der Lastenteilung auf europäischer Ebene verfehlen würde. Dies könnte zusätzliche Anstrengungen zum Ausgleich von Emissionen (über den Handel mit Emissionsrechten) oder Strafen nach sich ziehen.

Unter Berücksichtigung der Annahme, dass der weitere Ausbau der EE-Kapazitäten über den Pfad des 80%-Szenarios hinaus aufgrund von Flächenrestriktionen, mangelnder öffentlicher Akzeptanz und geringer Ausbauraten begrenzt ist, könnte der Einsatz von mehr gasbasierten Technologien dazu beitragen Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Mögliche Optionen sind die Förderung von Gasmotoren als Ersatz für Otto- und Dieselmotoren im Verkehrssektor oder ein schnellerer Ausstieg aus der Braunkohle-/ Steinkohleverstromung.

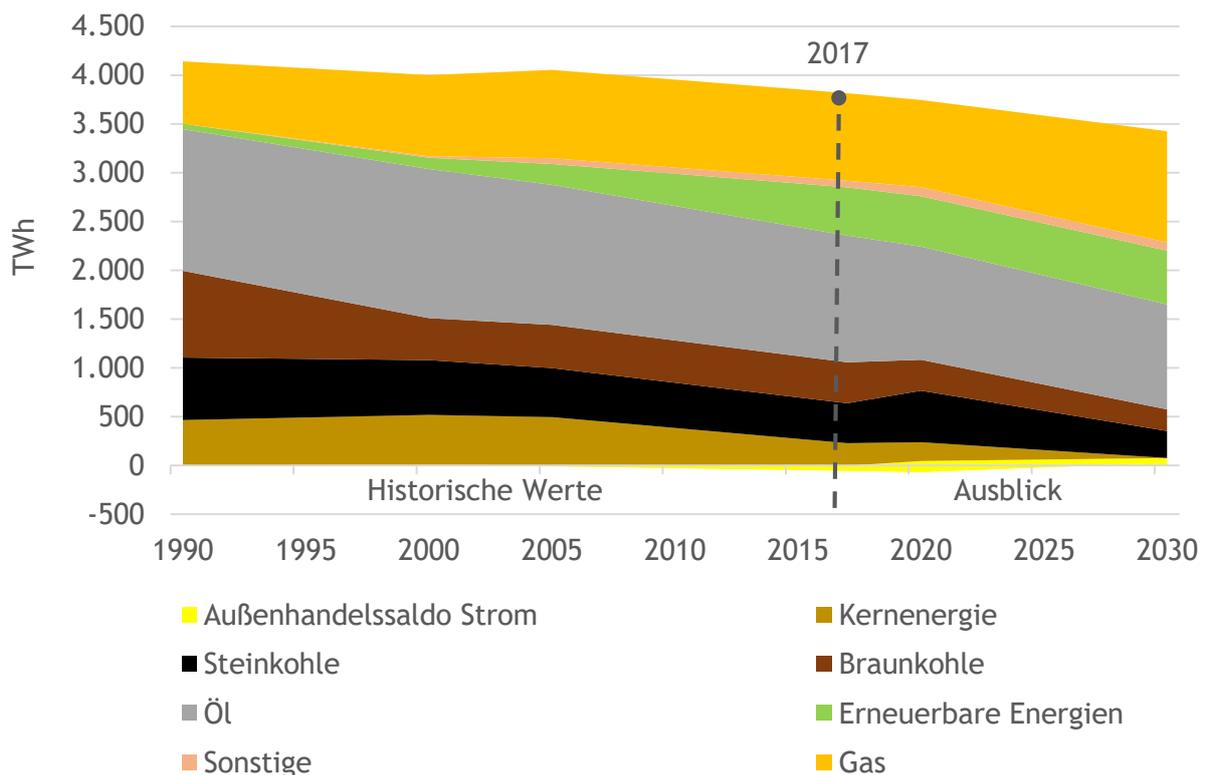


ABBILDUNG 4: PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH - AUSBLICK GEDANKENEXPERIMENT

Quellen: AGEBA 2017a; eigene Berechnungen basierend auf Fraunhofer ISI et al. 2017.

⁴⁹ Diese Berechnung basiert auf der Annahme, dass es keinen Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) oder emissionsneutralen synthetischen Kraftstoffen gibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Szenario mit geringer Steigerung der Energieeffizienz und begrenztem Ausbau erneuerbarer Energien zu einer anhaltend hohen Nachfrage nach konventionellen Energiequellen führen könnte. Insbesondere die Nachfrage nach Gas könnte bis 2030 steigen.

Abbildung 5 gibt einen Überblick über den historischen und geschätzten Gasbedarf sowie die prognostizierte inländische Förderung in Deutschland. Auf der linken Seite wird der geschätzte Gasbedarf aus dem 80%-Szenario von Fraunhofer ISI et al. 2017 dargestellt; auf der rechten Seite wird der geschätzte Gasbedarf basierend auf den Annahmen im Gedankenexperiment dargestellt. Während die Nachfrage im 80%-Szenario von 843 TWh auf 700 TWh bis 2030 sinkt, würde der Gasbedarf im Gedankenexperiment auf 1105 TWh steigen.

Der nationale Gasbedarf muss durch Importe sowie heimische konventionelle, synthetische oder unkonventionelle Gasproduktion gedeckt werden. Die nationale Gasförderung ist seit 2005 rückläufig und wird aufgrund sinkender konventioneller Ressourcen voraussichtlich bis 2030 weiter zurückgehen.⁵⁰ Synthetisches Gas, produziert durch Power-to-Gas, wird gemäß der betrachteten Studien in den nächsten zehn Jahren nicht wirtschaftlich sein.⁵¹ Daher sind die verbleibenden Optionen zur Deckung des Bedarfs Importe und unkonventionelles Gas. Im Folgenden werden diese Optionen unter besonderer Berücksichtigung der Gasbeschaffungsmöglichkeiten und der Importabhängigkeit diskutiert.

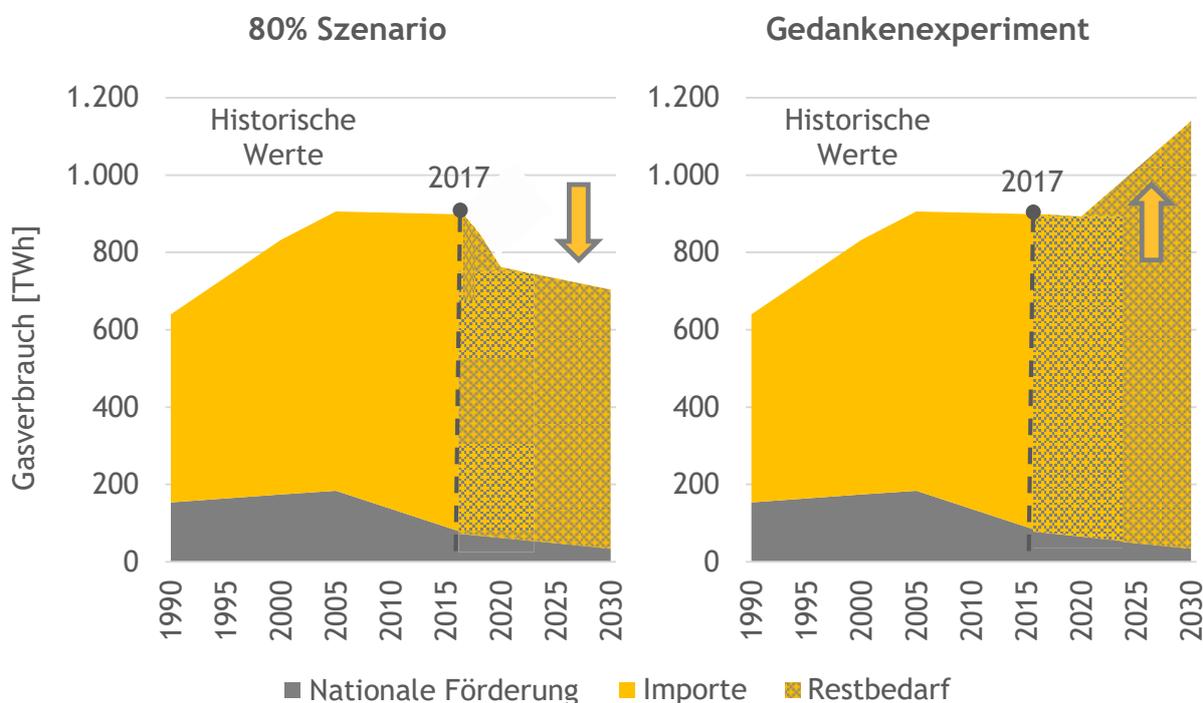


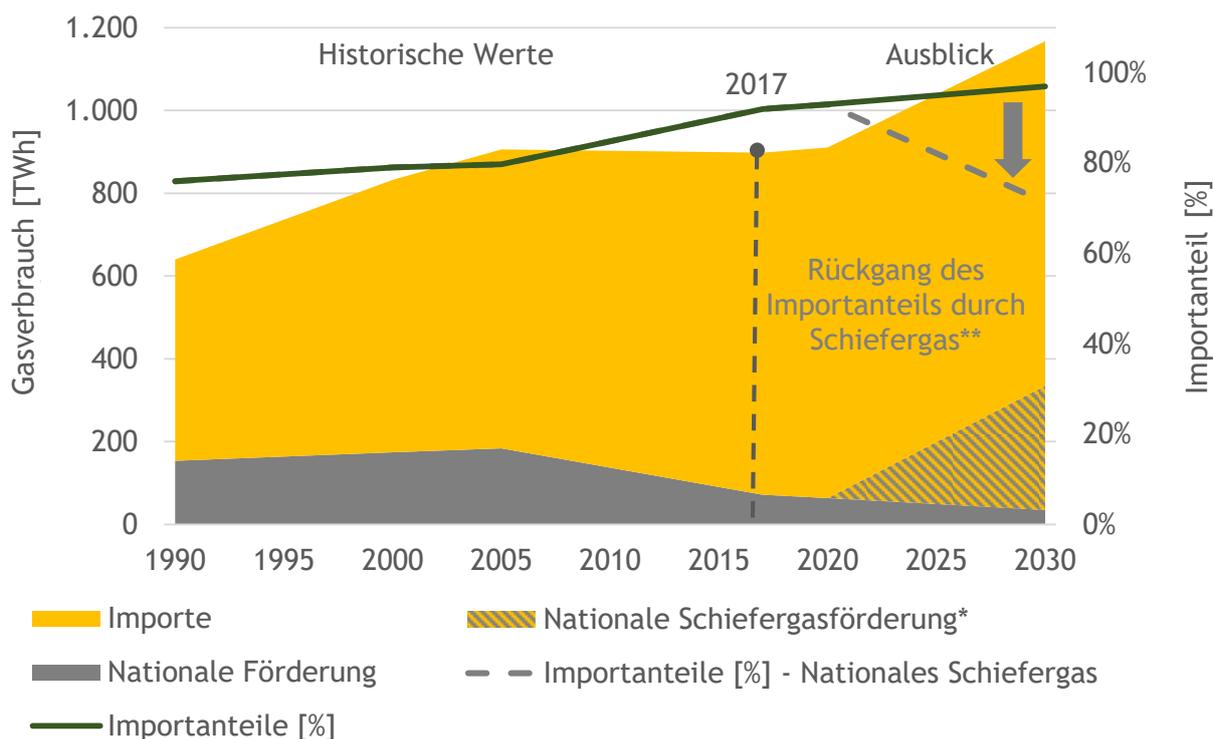
ABBILDUNG 5: GESCHÄTZTER GASBEDARF UND NATIONALE FÖRDERUNG IN DEUTSCHLAND
 Quellen: AGEB 2017a; Fraunhofer ISI et al. 2017; eigene Berechnungen basierend auf Fraunhofer ISI et al. 2017.

⁵⁰ Siehe ENTSG 2017

⁵¹ Siehe dena 2017a. Eine andere Möglichkeit zur Erzeugung von synthetischem Erdgas ist die Nutzung fossiler Brennstoffe wie Braunkohle, Steinkohle oder Biokraftstoffen. Aufgrund der hohen Emissionen beim Einsatz fossiler Brennstoffe und des sehr begrenzten Potenzials für Biokraftstoffe wird im Folgenden von einer Diskussion dieser Optionen abgesehen.

Gasbezugsmöglichkeiten und Importabhängigkeit

Abbildung 6 zeigt den historischen und geschätzten Gasbedarf in Deutschland, basierend auf den Annahmen des oben beschriebenen Gedankenexperiments. Historisch ist der Importanteil durch rückläufige nationale Förderung und steigende Nachfrage seit 1990 stetig gestiegen. So wurden 2016 rund 91% des nationalen Gasbedarfs durch Importe gedeckt.⁵² Der Importanteil würde, ceteris paribus, bis 2030 aufgrund der weiter abnehmenden nationalen Förderung und der steigenden Nachfrage auf rund 97% steigen. Für den Fall, dass eine Verringerung des Importanteils und ein Ausgleich der rückläufigen nationalen Erdgasförderung politisch erwünscht und/oder wirtschaftlich machbar wären, bietet sich der Einsatz von heimischem, unkonventionellem Gas/Schiefergas an.⁵³ Verschiedene Studien schätzen das technische Schiefergaspotenzial in Deutschland.⁵⁴ Im Folgenden gehen wir von einer (im Vergleich konservativen) Schätzung für das technische Potenzial von 7.000 TWh in Deutschland auf Basis der BGR 2016 aus. Des Weiteren gehen wir davon aus, dass davon zwischen 2020 und 2030 ca. 1.500 TWh erschlossen werden könnten; mit ca. 300 TWh wird die höchste Förderquote im Jahr 2030 erreicht. Unter diesen Annahmen würde der Importanteil auf rund 71% sinken.



* Wirtschaftlichkeit, Bevölkerungsakzeptanz und rechtliche Restriktionen nicht berücksichtigt

** Annahme: Technisch nutzbares Potenzial von 7.000 TWh; 1.500 TWh erschlossen bis 2030

ABBILDUNG 6: GESCHÄTZTER GASBEDARF UND POTENZIELLE SCHIEFERGASFÖRDERUNG IN DEUTSCHLAND

Quellen: AGEb 2017a, 2017b; BGR 2016; ENTSOG 2017; eigene Berechnungen.

⁵² Die Importe stammen aus den Niederlanden (23%), Norwegen (29%), Russland und anderen Ländern (42%). Aus Datenschutzgründen nur kumulierte Werte für Russland und andere (Anteil der konventionellen Gasimporte aus Russland im Jahr 2015: 39%). Siehe AGEb 2017b.

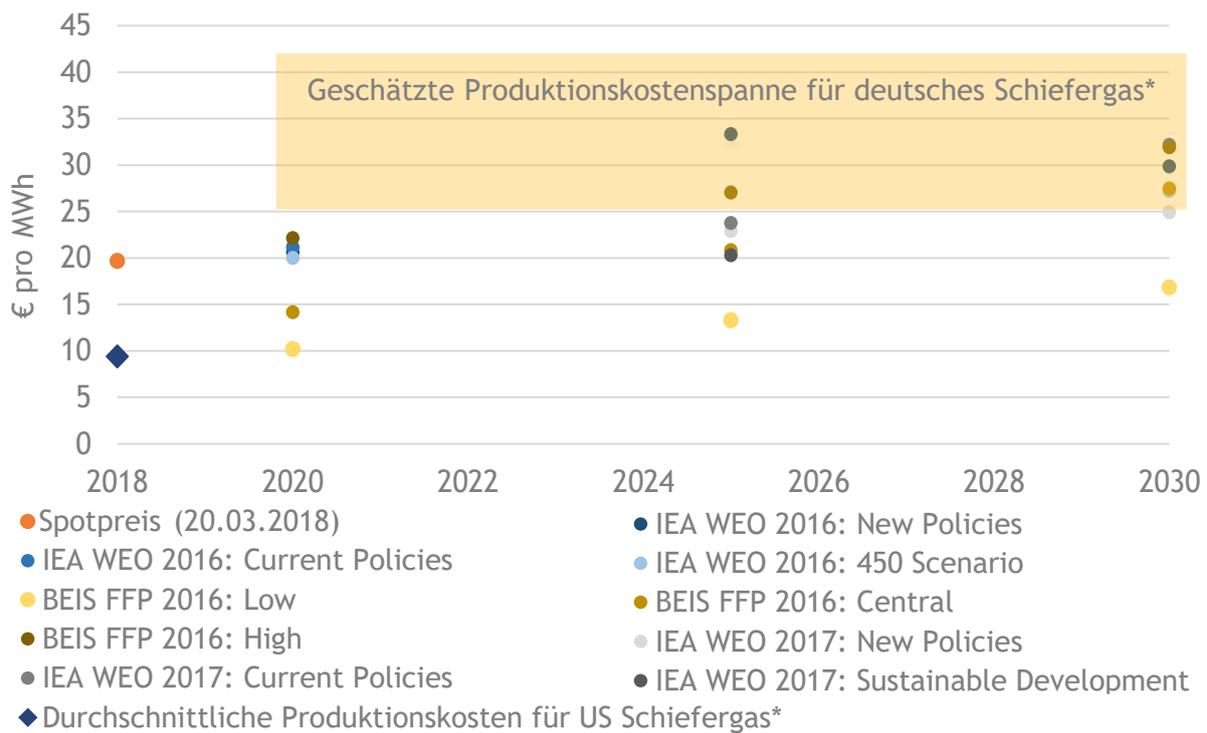
⁵³ Die Begriffe unkonventionelles Gas und Schiefergas werden hier synonym verwendet, da Schiefergas die bekannteste Form von unkonventionellem Gas ist. Schiefergas wird durch das Aufbrechen (engl. fracturing) tiefer Gesteinsformationen freigesetzt. Beim sogenannten Fracking-Verfahren werden große Mengen Wasser, vermischt mit Sand und Chemikalien, unter hohem Druck in den Boden gepumpt, um tiefe Gesteinsformationen aufzubrechen.

⁵⁴ Siehe EIA 2015, BGR 2012 und BGR 2016

Die Förderung von Schiefergasressourcen, insbesondere in den USA, in den letzten Jahren hat eine kontroverse öffentliche Debatte über die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens ausgelöst. Auf der einen Seite führen kritische Stimmen negative Umweltauswirkungen und mangelnde Wirtschaftlichkeit an. Auf der anderen Seite betonen die Befürworter die Verringerung der Importabhängigkeit und möglicherweise sinkende Gaspreise sowie steigendes Wirtschaftswachstum. In den USA hat der Schiefergasboom - in Verbindung mit erheblichen Mengen unkonventioneller Ölförderung - bspw. eine deutliche Wiederbelebung der Petrochemie und der chemischen Industrie ausgelöst.

ACER 2017 stellt fest, dass es eine geringe Diversifizierung der deutschen Gasversorgung gibt und dass die steigende Marktmacht Russlands in diesem Zusammenhang als kritisch angesehen werden könnte. ewi ER&S 2016 kommt hingegen zu dem Schluss, dass der europäische Gasmarkt in den nächsten Jahren über ausreichende Kapazitäten für LNG-Importe und Pipeline-Verbindungen verfügt, um einen hohen Grad an vorgelagertem Wettbewerb zu gewährleisten. Die ewi ER&S-Studie stellt außerdem fest, dass im Falle einer deutlich steigenden Gasnachfrage in Europa und Asien, steigende Marktmacht auf der Angebotsseite wieder ein Thema werden könnte. Riedel et al. 2017 weisen darauf hin, dass es strategische Gründe für die Förderung von Schiefergas geben könnte: „On the one hand, this form of supply diversification could be beneficial with respect to supply security and on the other hand, it could weaken the bargaining power of suppliers in economical as well as political terms.“ Aus politischer Sicht und angesichts des aktuellen Stands der öffentlichen Diskussion - so die Autoren - könnte es jedoch einfacher sein, die Marktmacht auf der Angebotsseite durch eine Erhöhung der LNG-Importkapazitäten zu verringern.

Während sich ein Großteil der wissenschaftlichen Literatur mit der Abschätzung der technischen Potenziale oder Umweltauswirkungen beschäftigt, gibt es kaum Schätzungen der Förderkosten von Schiefergas in Deutschland. Nach Kenntnis der Autoren befindet sich die einzige verfügbare Schätzung in Riedel et al. 2017. Die Autoren untersuchen die potenzielle Wirtschaftlichkeit von Schiefergasressourcen in Europa. Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass Schiefergas in Europa unter den derzeitigen wirtschaftlichen Bedingungen mit einem Großhandelspreis von rund 20 €/MWh nicht wettbewerbsfähig ist. In Deutschland werden die gesamten Förderkosten heute auf 25 bis 42 €/MWh geschätzt. Zusätzliche Preiskomponenten wie Transport oder Gewinnspanne werden nicht berücksichtigt und würden zu noch höheren Kosten führen. Starke Preiserhöhungen für konventionelles Gas, wie sie beispielsweise vom World Energy Outlook 2016 (Szenario: New Policies) oder dem britischen Department of Business Energy & Industrial Strategy (BEIS) (Szenario: High) erwartet werden, könnten das Gesamtbild zwar verändern. Die Prognose im World Energy Outlook 2017 geht jedoch davon aus, dass die Großhandelspreise unter den geschätzten Förderkosten für Schiefergas in Europa liegen.



* Nicht inbegriffen sind bspw. Transportkosten oder Gewinnmarge

ABBILDUNG 7: AUSBLICK ERDGASPREIS UND GESCHÄTZTE FÖRDERKOSTEN FÜR SCHIEFERGAS

Quellen: Eigene Abbildung basierend auf IEA 2016; IEA 2017; BEIS 2016; Mistré et al. 2018; Riedel et al. 2017.

Neben ökonomischen Aspekten werden die möglichen negativen Umweltauswirkungen der Schiefergasförderung kontrovers diskutiert. Berichte über Grundwasserkontaminationen und Erdbeben in den USA, die durch Fracking und Horizontalbohrungen verursacht wurden, haben die öffentliche Meinung zu Schiefergas negativ gestimmt. Zumal in Deutschland die meisten Lagerstätten in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen liegen, also in Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte.⁵⁵ Der hohe Wasserverbrauch ist ein zusätzliches Argument für die Kritiker. Die Umweltauswirkungen der Schiefergasförderung haben sich jedoch in den letzten Jahrzehnten gebessert. Eine Studie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2016) analysiert die Umweltauswirkungen der Schiefergasförderung in Deutschland und geht weder von signifikanten Auswirkungen auf die Grundwasserleitungen/Speicher noch seismischen Auswirkungen aus. Dennoch ist die öffentliche Wahrnehmung in Deutschland durch mögliche negativen Umweltauswirkungen geprägt: Die ersten Aktivitäten der Schiefergasförderung von Exxon Mobil in Deutschland führten zu massiven politischen und sozialen Protesten. Exxon hat daher im Jahr 2011 beschlossen, das Projekt einzustellen und die politischen Vorgaben für Schiefergasförderung wurden verschärft.⁵⁶

Angesichts der noch bestehenden Unsicherheiten über die Umweltauswirkungen von Fracking hat die Bundesregierung im Februar 2017 eine Verordnung verabschiedet. Sie hat das Verbot unkon-

⁵⁵ Siehe EWI 2013

⁵⁶ Siehe BGR 2012

ventioneller Fracking-Aktivitäten gesetzlich verankert. In Deutschland gibt es lediglich vier Standorte, an denen die Schiefergasförderung /unkonventionelles Fracking für wissenschaftliche Zwecke erlaubt ist. Ziel ist es, die Auswirkungen auf die Umwelt und die geografischen Bedingungen weiter zu erforschen. Die kommerzielle Schiefergasförderung ist bis mindestens 2021 verboten.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Europäische und nationale Klimaschutzvorschriften legen ehrgeizige Ziele für die Reduzierung von Treibhausgasen fest. Derzeit erschweren jedoch inkonsistente Zieldefinitionen und politische Instrumente die Zielerreichung. Eine bessere Abstimmung der Ziele und Instrumente könnte die Effizienz von Klimaschutzmaßnahmen erhöhen und die verbundenen Unsicherheiten verringern.

Aktuelle Studien, die mögliche Szenarien für die Verringerung von Treibhausgasemissionen in Deutschlands analysieren, ignorieren i.d.R. europäische Ziele - also die Vorgaben des EU ETS und der Lastenteilungsverordnung - und konzentrieren sich stattdessen auf nationale Ziele. Dadurch wird der potentielle Nutzen einer koordinierten Klimaschutzpolitik nicht ausgeschöpft.

Das Erreichen der Klimaschutzziele erfordert erhebliche Anstrengungen in allen Sektoren. Eine Fortschreibung historischer Trends unter der Annahme, dass keine ehrgeizigeren Maßnahmen umgesetzt werden, würde zu deutlich höheren Treibhausgasemissionen führen. Da die neue Bundesregierung die Ziele für 2020 bereits aufgegeben hat, ist unklar, wie kurz- und mittelfristig das Ziel für 2030 erreicht werden kann. Im vorliegenden Dokument wurde eine Reihe von Studien betrachtet, die technische und wirtschaftliche Aspekte möglicher Minderungspfade analysieren und aufzeigen, welche Technologien wann benötigt werden und wie das kosteneffiziente Zusammenspiel der Sektoren aussehen könnte. Allerdings werden zentrale (und auch zukünftig relevante) Aspekte wie Reboundeffekte, langsame Anpassungsraten von Technologien und Akzeptanzprobleme, die das Erreichen der 2020-Ziele verhindert haben, in diesen Studien häufig vernachlässigt. Mit Blick auf die Unsicherheiten in Bezug auf die Strategien zur Erreichung der Klimaziele helfen Sensitivitätsszenarien mit unterschiedlichen Annahmen die Minderungspfade kritisch einzuschätzen. Insbesondere regulatorische und soziale Faktoren geben Rahmenbedingungen vor, die eine Transformation des Energiesystems ermöglichen oder behindern. Versorgungssicherheitsaspekte können sich in Abhängigkeit von bestimmten Entwicklungen als kritisch erweisen und müssen antizipiert werden. Die Versorgungssicherheit hat verschiedene Facetten, die von einer ausreichenden Verfügbarkeit von Erzeugungskapazitäten zum Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage bis hin zur langfristigen Sicherung der Verfügbarkeit von Energieträgern wie Öl und Gas reichen.

Erdgas könnte, aufgrund der ehrgeizigen Treibhausgasreduzierungsziele und möglicher Zielverfehlungen bei der Senkung des Energieverbrauchs, auch in den kommenden Jahrzehnten noch eine zentrale Rolle im Energiesystem spielen. Allerdings gehen die nationalen Ressourcen und damit die Förderung von Erdgas zurück. Dies kann zu einem steigenden Importanteil von Gas führen. Eine theoretische Alternative zu konventionellen Gasimporten ist die nationale Förderung von Schiefergas. Obwohl in Deutschland ein erhebliches technisches Potenzial für Fracking besteht, haben Bedenken hinsichtlich möglicher Umweltauswirkungen zu einem gesetzlichen Verbot des kommerziellen Fracking bis 2021 geführt. Wenn diese Bedenken z. B. durch technologischen Fortschritt ausgeräumt und die Kostennachteile gegenüber den prognostizierten Großhandelspreisen abgebaut werden können, sind unkonventionelle heimische Gasquellen eine mögliche Option.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

CCS	Carbon Capture and Storage
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CSU	Christlich-Soziale Union in Bayern
EE	Erneuerbare Energien
EK	Europäische Kommission
EEA	European Environmental Agency
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ESD	Effort Sharing Decision (dt. Lastenteilungsentscheidung)
ESR	Effort Sharing Regulation (dt. Lastenteilungsverordnung)
EU	Europäische Union
EUA	European Emission Allowances (dt. Europäische Emissionsberechtigungen)
EU ETS	EU Emissions Trading System (dt. EU Emissionshandelssystem)
LULUCF	Land use, land use change and forestry (dt. Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
MSR	Marktstabilitätsreserve
NDC	Nationally Determined Contributions
PtH	Power-to-Heat
PtX	Power-to-X
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
UNFCCC	UN Framework Convention on Climate Change (dt. Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen)

LITERATURVERZEICHNIS

Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER, 2017): Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Gas Markets in 2016, Oktober 2017, URL: https://www.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/ACER%20Market%20Monitoring%20Report%202016%20-%20ELECTRICITY%20AND%20GAR%20RETAIL%20MARKETS.pdf (abgerufen am 20. März 2018).

Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, Februar 2018, URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf (abgerufen am 1. März 2018).

Aral (2017): Aral Studie - Trends beim Autokauf 2017, URL: <https://www.aral.de/content/dam/aral/Presse%20Assets/pdfs-Broschueren/Aral-Studie-Trends-beim-Autokauf-2017.pdf> (abgerufen am 13. April 2018).

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB, 2017a): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2016, September 2017, URL: <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html> (abgerufen am 22. Februar 2018).

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB, 2017b): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016, Februar 2017, URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2016_20170301_interaktiv_dt.pdf (abgerufen am 20. März 2018).

Boston Consulting Group & Prognos (BCG & Prognos, 2018): Klimapfade für Deutschland, Boston Consulting Group (BCG), Prognos AG, Januar 2018, URL: https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/BDI-Studie_-_Klimapfade_f%C3%BCr_Deutschland_-_Druckversion_12.01.2018.pdf (abgerufen am 13. Februar 2018).

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2012): Abschätzungen des Erdgaspotenzials aus dichten Tongesteinen (Schiefergas) in Deutschland, Mai 2012, URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/BGR_Schiefergaspotenzial_in_Deutschland_2012.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 15. März 2018)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2016): Schieferöl und Schiefergas in Deutschland Potenziale und Umweltaspekte, Januar 2016, URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Abschlussbericht_13MB_Schieferoelgaspotenzial_Deutschland_2016.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D5 (abgerufen am 15. März 2018).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU, 2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (abgerufen am 26. Februar 2018).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2015): Die Energie der Zukunft - Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, November 2015, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/vierter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (abgerufen am 26. Februar 2018).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2017): Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2016, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (abgerufen am 16. April 2018).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2018): Entwicklung der Stromerzeugung und der installierten Leistung von Photovoltaikanlagen, URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Textbausteine/Banner/banner_photo_voltaik.html (abgerufen am 13. April 2018).

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW, 2017a): Entwicklung der Strompreise, URL: <https://www.bdew.de/presse/pressemappen/entwicklung-der-strompreise> (abgerufen am 13. April 2018).

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW, 2017b): Gaspreis für Haushalte 2017: Drei wesentliche Bestandteile, URL: <https://www.bdew.de/presse/weitere-pressegrafiken/gaspreis-haushalte-2017> (abgerufen am 13. April 2018).

Bundesverband Wärmepumpen e.V. (BWP, 2017): Wärmepumpenbestand Entwicklung in Deutschland, 2011-2017, URL: https://www.waermepumpe.de/typo3temp/yag/02/49/Waermepumpenbestand_Deutschland_2011-2017_24995_5ab2134031.jpg (abgerufen am 13. April 2018).

Bundeszentrale für politische Bildung (bpb, 2013): Ein Ziel, viele Strategien - Klimapolitik in Deutschland, URL: <http://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38554/klimapolitik-in-deutschland> (abgerufen am 16. April 2018).

Carp, S. (2017): EU fails to lead the way on smart carbon markets - Analysis of the ETS reform, Sandbag 14. November 2017, URL: <https://sandbag.org.uk/2017/11/14/eu-fails-show-leadership-cop23-analysis-ets-reform/> (abgerufen am 6. Februar 2018).

CDU/CSU/SPD (2018): Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land, Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, Berlin: 7. Februar 2018.

Council of the European Union (2017): Press release 632/17. Reform of the EU emissions trading system - Council endorses deal with European Parliament, Brussels: 22 November 2017.

Department for Business, Energy & Industrial Strategy U.K. (BEIS, 2016): Updated Energy and Emissions Projections 2016, März 2017, URL: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/599539/Updated_energy_and_emissions_projections_2016.pdf (abgerufen am 20. März 2018).

Deutsche Energie-Agentur (dena, 2017a): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin: November 2017, URL: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9214_dena-Leitstudie-Integrierte-Energiewende_Zwischenfazit.pdf (abgerufen am 28. Februar 2018).

Deutsche Energie-Agentur (dena, 2017b): Gebäude Studie - Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor, ewi ER&S, ITG Dresden, FIW München, Oktober 2017, URL: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/bau/9220_Gebaeuestudie_Szenarien_Klima-_und_Ressourcenschutzpolitik_2050.pdf (abgerufen am 28. Februar 2018).

Diekhoff et al. (2014): Zur Interpretation von Energieszenarien, Dezember 2014, C. Dieckhoff, H.-J. Appelrath, M. Fishedick, A. Grunwald, F. Höffler, C. Maier, W. Weimer-Jehle, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, URL: http://www.akademienunion.de/fileadmin/redaktion/user_upload/Publikationen/Stellungnahmen/141203_Energieszenarien_Web_final.pdf (abgerufen am 16. April 2018).

Elkerbout, M. and C. Egenhofer (2017): The EU ETS price may continue to be low for the foreseeable future - Should we care?, Centre for European Policy Studies (CEPS), CEPS Policy Insights 2017/22, Brussels.

EU ETS Richtlinie 2003/87/EG (2003): Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, OJ L 275/32, Brüssel: 25. Oktober 2003.

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI, 2013): Unkonventionelles Erdgas in Europa - Effekte auf Versorgung, Nachfrage und Preise bis 2035, Dezember 2013, URL: http://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2015/12/Unkonventionelles_Erdgas_in_Europa.pdf (abgerufen am 15. März 2018).

Energy Information Administration U.S. (EIA, 2015): World Shale Resource Assessments, September 2015, URL: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas> (abgerufen am 20. März 2018).

Erneuerbare-Energien-Gesetze (EEG, 2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, Berlin: 17. Juli 2017.

Europäische Kommission (EK, 2011): Communication COM/2011/0112. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, Brussels: 8 March 2011.

Europäische Kommission (EK, 2018a): Climate strategies & targets, URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en (abgerufen am 16. April 2018).

Europäische Kommission (EK, 2018b): Land use and forestry proposal for 2021-2030, URL: https://ec.europa.eu/clima/lulucf_en#tab-0-0 (abgerufen am 16. April 2018).

Europäische Kommission (EK, 2018c): Market Stability Reserve, URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/reform_en (abgerufen am 16. April 2018).

European Environmental Agency (EEA, 2017a): EU Emissions Trading System (ETS) data viewer, URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1> (abgerufen am 6. Februar 2018).

European Environmental Agency (EEA, 2017b): Greenhouse gas emissions of ESD sectors, URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/esd-1> (abgerufen am 6. Februar 2018).

European Network of Transmission System Operators for Gas (ENTSO-G, 2017): Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2017, April 2017, URL: <https://www.entsog.eu/publications/tyndp/2017#ENTSO-G-TEN-YEAR-NETWORK-DEVELOPMENT-PLAN-2017> (abgerufen am 20. März 2018).

ewi Energy Research & Scenarios (ewi ER&S, 2016): Options for Gas Supply Diversification for the EU and Germany in the next Two Decades, Cologne and London: Oktober 2016, URL: <http://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2016/10/Options-for-Gas-Supply-Diversification.pdf> (abgerufen am 20. März 2018).

ewi Energy Research & Scenarios (ewi ER&S, 2017): Energiemarkt 2030 und 2050 - Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO₂-Minderung, November 2017, URL: http://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2017/11/ewi_ERS_Energiemarkt_2030_2050.pdf (abgerufen am 28. Februar 2018).

Fraunhofer ISI et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario, Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, IFEU Heidelberg, September 2017, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 13. Februar 2018).

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE, 2018): Stromerzeugung in Deutschland in 2017, URL: https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2017 (abgerufen am 13. April 2018).

International Energy Agency (IEA, 2016): World Energy Outlook 2016, Paris: November 2016

International Energy Agency (IEA, 2017): World Energy Outlook 2017, Paris: November 2017

Klimaretter (2018): Deutschland verfehlt auch EU-Klimaziel, V. Kern, URL: <http://www.klimaretter.info/politik/hintergrund/24196-deutschland-verfehlt-auch-eu-klimaziel> (abgerufen am 16. April 2018).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA, 2017a): Jahresbilanz der Neuzulassungen 2017, URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html (abgerufen am 13. April 2018).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA, 2017b): Pressemitteilung Nr. 06/2017 - Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2017 - korrigierte Fassung, URL: https://www.kba.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2017/pm_06_17_bestand_01_17_Korr_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 13. April 2018).

Lastenteilungsentscheidung (ESD, 2009): Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020, OJ L 140/136, Brüssel: 5 Juni 2009.

Lastenteilungsverordnung (ESR, 2018): Regulation (EU) 2018/... of the European Parliament and of the Council of ... on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement and amending Regulation (EU) No 525/2013, 2016/0231 (COD), Brüssel: 26. April 2018.

Linz, M. (2015): Suffizienz als politische Praxis - Ein Katalog, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 21. Januar 2015, URL: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5735> (abgerufen am 28. Februar 2018).

Löschel et al. (2016): Stellungnahme zum fünften Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2015, A. Löschel, G. Erdmann, F. Staiß, H.-J. Ziesing, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-stellungnahme.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (abgerufen am 13. April 2018).

Mistré, M., M. Crénes and M. Hafner (2018): Shale gas production costs: Historical developments and outlook, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300014> (abgerufen am 13. April 2018).

Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz (MIE, 2014): Energieeffizienz - Unternehmen besser informieren und beraten, BMWi / BMU / DIHK, Dezember 2014, URL: http://www.mittelstand-energiewende.de/fileadmin/user_upload_mittelstand/MIE_vor_Ort/Handlungsempfehlungen_final.pdf (abgerufen am 28. Februar 2018).

Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (NAPE, 2017): Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (NAPE) 2017 der Bundesrepublik Deutschland gemäß der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz (2012/27/EU), Berlin: März 2017.

Riedel et al. (2017): Analysis of the Potential Economic Viability of Shale Gas Resources in Europe, T. G. Riedel, D. K. J. Schubert, P. Hauser, M. Schmidt, D. Möst, August 2017, URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12398-017-0210-2.pdf> (abgerufen am 15. März 2018).

Sørhus, I., A. Nordeng and H. Fjellheim (2017): Grand compromise on ETS reform set to tighten market, Thompson Reuters 10 November 2017, URL: <https://www.politico.eu/wp-content/uploads/2017/11/Grand-compromise-on-ETS-reform-set-to-tighten-market-copy-2.pdf> (abgerufen am 6. Februar 2018).

Umweltbundesamt (UBA, 2014): Rebound effects, 08. Juli 2014, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/economic-legal-dimensions-of-resource-conservation/rebound-effects> (abgerufen am 28. February 2018).

Umweltbundesamt (UBA, 2016): Klimaschutzziele Deutschlands, 14. November 2016, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimaschutzziele-deutschlands#textpart-1> (abgerufen am 22. Februar 2018).