

TRANSFORMATION DES STROMSEKTORS NACH DEM BUDGETANSATZ – KOHLEAUSSTIEG 2035

**Inka ZIEGENHAGEN, Felix Chr. MATTHES, Lukas EMELE,
Hauke HERMANN, Charlotte LORECK, Frank PETER**

Prognos AG, Goethestraße 85, DE-10623 Berlin, www.prognos.com und
Öko-Institut e.V., Schicklerstraße 5-7, DE-10179 Berlin, www.oeko.de

Kurzfassung: Zur Erreichung der deutschen Klimaziele und des 2°-Celsius-Ziels ist von zentraler Bedeutung, wie schnell die Energiewirtschaft dekarbonisiert werden kann. Mit 335 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2015 ist dieser Sektor für die meisten Emissionen verantwortlich. Nach Angaben des Klimaschutzplan 2050 sollen die Emissionen der Energiewirtschaft bis zum 2030 auf 175 bis 183 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente reduziert werden. Dieses entspricht einer Minderung gegenüber 1990 von rund 60%. Zur Erreichung des 2°-Celsius-Ziels sind jedoch nicht die Emissionen eines einzelnen Stichjahrs relevant. Vielmehr müssen die kumulierten Emissionen über die Zeit (Emissionsbudget) betrachtet werden. Im Rahmen einer Untersuchung für den WWF Deutschland wurde untersucht, wie ein faires Emissionsbudget für den deutschen Stromsektor abgeleitet werden kann und welche Maßnahmen erforderlich sind, um dieses Budget einzuhalten.

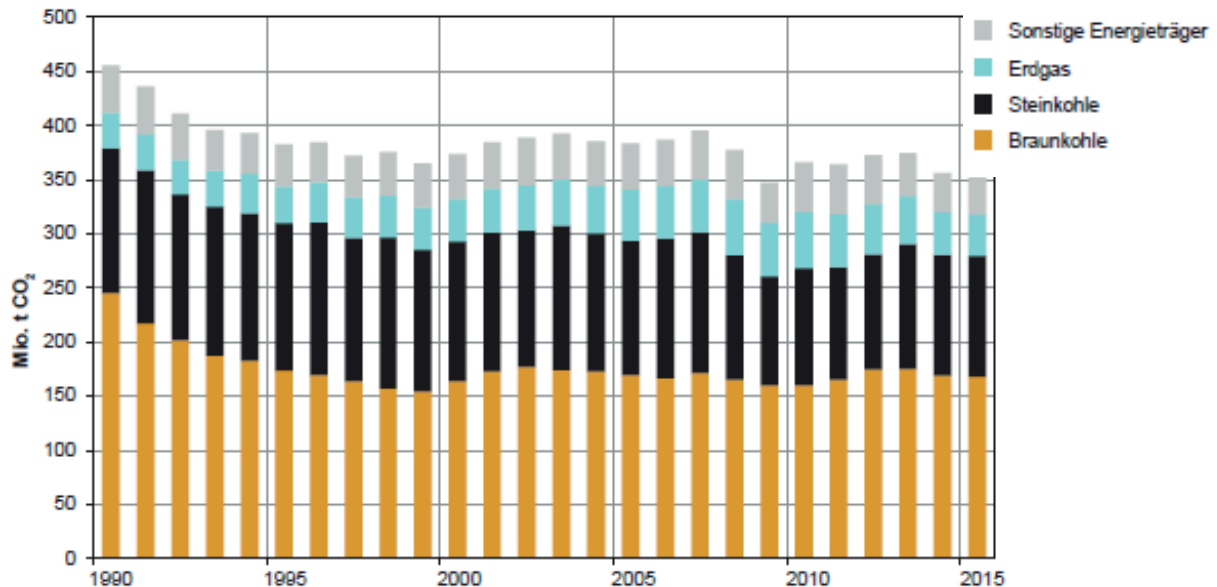
Keywords: Kohleausstieg, Emissionen, Klimaziele, CO₂-Budget, Stromsektor

1 Ausgangslage

Die deutsche Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die nationalen Treibhausgase bis 2050 um 80 bis 95% im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Hintergrund hierfür ist das Bekenntnis der internationalen Staatengemeinschaft, die Erderwärmung auf deutlich unter 2° Celsius zu begrenzen – und wenn möglich 1,5° Celsius anzustreben. Darüber hinaus wurden von der Bundesregierung Zwischenziele für einzelne Stichjahre formuliert: im Vergleich zu 1990 sollen die Emissionen bis 2020 um 40% sinken, bis 2030 und 2040 um 55% bzw. um 70%. Im Klimaschutzplan 2050 wird zudem für das Jahr 2030 das Gesamtziel auf sektorale Emissionssenkungsziele heruntergebrochen. Der Bereich Energiewirtschaft darf demnach im Jahr 2030 maximal 175 bis 183 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente ausstoßen. Für den Stromsektor bedeutet dieses ein abgeleitetes Senkungsziel von 180 bis 188 Mio. Tonnen (vgl. Öko-Institut 2017).

Der Stromsektor hat aktuell mit einem Anteil von rund 40% den größten Anteil an den Gesamtemissionen in Deutschland. Abbildung 1 zeigt die Emissionen des Stromsektors in Deutschland im Zeitverlauf. Seit 1995 sind die Emissionen hier nahezu konstant. Grund dafür sind die konstanten Emissionen der Braun- und Steinkohleerzeugung, die für etwa 80% der Emissionen der deutschen Kraftwerke verantwortlich sein.

Abbildung 1: CO₂-Emissionen der Stromerzeugungsanlagen in Deutschland 1990 bis 2015



Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

Um das 2-Grad-Ziel zu erreichen, ist nicht nur wichtig, ob die Emissionen in einzelnen Stichjahren gesenkt werden können. Entscheidend sind die kumulierten Emissionen über den Zeitverlauf. In einer Studie für den WWF Deutschland (vgl. Öko-Institut & Prognos 2017) wurde das zur Verfügung stehende Emissionsbudget für den deutschen Stromsektor hergeleitet und ermittelt, wie der Stromsektor mit diesem Budget transformiert werden kann.

2 Methodik

2.1 Herleitung eines Emissionsbudgets für den deutschen Stromsektor

Im ersten Schritt der Untersuchung wurde ermittelt, wie hoch das zur Verfügung stehende Emissionsbudget für den deutschen Stromsektor sein könnte. Ausgangspunkt dieser Fragestellung ist das weltweit noch zur Verfügung stehende Budget (vgl. Tabelle 1).

Je nach angestrebtem Ziel und der Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung beträgt das restliche Budget ab dem Jahr 2015 zwischen 240 Gigatonnen CO₂ (1,5°C und 66% der Modellläufe) und 1290 Gigatonnen (2°C und 33% Wahrscheinlichkeit). Strebt man das Ziel von 2° C mit einer Wahrscheinlichkeit von 66% an, so können weltweit insgesamt noch 890 Gigatonnen emittiert werden (vgl. IPCC 2013, 2014).

Aus dem weltweiten Budget wurde abgeleitet, wie ein faires nationales Budget für Deutschland aussehen kann. Diese Frage umfasst verschiedene Teilaspekte. Zum einen stellt sich die Frage, wie ein gerechter Verteilungsschlüssel gebildet werden kann. Hier sind verschiedene Ansätze denkbar: heutige Emissionen, heutige Bevölkerung, zukünftige Bevölkerung. Zum anderen muss diskutiert werden, ob und ab welchem Zeitpunkt historische Emissionen in der

Verteilung des weltweiten Budgets berücksichtigt werden müssen. Tabelle 2 zeigt das hergeleitete Budget für Deutschland anhand der drei verschiedenen Verteilungsschlüssel.

Tabelle 1: Weltweit zur Verfügung stehendes Emissionsbudget ab 2015 in Abhängigkeit des angestrebten Temperaturniveaus und der Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung

	CO ₂ -Emissionen		Globales CO ₂ -Budget	
	1870 bis 2010	ab 2011	2011 bis 2014	Verbleibendes Budget
	Gt CO ₂			
1,5 °C bei 66 % der Modellläufe	1.914	400	160	240
1,5 °C bei 50 % der Modellläufe	1.914	550	160	390
1,5 °C bei 33 % der Modellläufe	1.914	850	160	690
2 °C mit 66 % Wahrscheinlichkeit	1.914	1.049	160	890
2 °C mit 50 % Wahrscheinlichkeit	1.914	1.159	160	1.000
2 °C mit 33 % Wahrscheinlichkeit	1.914	1.449	160	1.290
3 °C bei 66 % der Modellläufe	1.914	2.400	160	2.240
3 °C bei 50 % der Modellläufe	1.914	2.800	160	2.640
3 °C bei 33 % der Modellläufe	1.914	3.250	160	3.090

Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

Tabelle 2: Emissionsbudget für Deutschland in Abhängigkeit des Verteilungsschlüssels, des angestrebten Temperaturniveaus und der Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung

	CO ₂ -Budget global	CO ₂ -Budget Deutschland		
		Emissionsanteil	Bevölkerungsanteil	
	ab 2015			aktuell
Gt CO ₂				
1,5 °C bei 66 % der Modellläufe	240	4,7	2,7	1,9
1,5 °C bei 50 % der Modellläufe	390	7,7	4,4	3,1
1,5 °C bei 33 % der Modellläufe	690	13,6	7,7	5,4
2 °C mit 66 % Wahrscheinlichkeit	890	17,5	9,9	7,0
2 °C mit 50 % Wahrscheinlichkeit	1.000	19,8	11,2	7,8
2 °C mit 33 % Wahrscheinlichkeit	1.290	25,3	14,4	10,1
3 °C bei 66 % der Modellläufe	2.240	44,0	25,1	17,5
3 °C bei 50 % der Modellläufe	2.640	51,9	29,5	20,7
3 °C bei 33 % der Modellläufe	3.090	60,7	34,6	24,2
Bezugsgrößen für die Anteilsberechnung	CO ₂ -Emissionen	Bevölkerung		
	2015	2015	2050	
	Gt CO ₂	Mio.		
Welt	40.844	7.347	9.725	
Deutschland	0.799	82	76	
Anteil Deutschland	2,0 %	1,1 %	0,8 %	

Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

In dieser Untersuchung wurde das zur Verfügung stehende Budget Deutschlands anhand des weltweiten Budgets von 890 Gigatonnen (2°C-Ziel mit Wahrscheinlichkeit von 66%) und der aktuellen Bevölkerung Deutschlands als Schlüssel angesetzt. Damit ergeben sich – ohne

Berücksichtigung von historischen Emissionen – 9,9 Gigatonnen, die insgesamt ab 2015 noch emittiert werden dürfen.

Tabelle 3: Emissionsbudget für den deutschen Stromsektor

	CO ₂ -Budget national	CO ₂ -Emissionen Stromsektor	CO ₂ -Budget Stromsektor	
	ab 2015	2015	aktuell	reduziert
	Gt CO ₂			
1,5 °C bei 66 % der Modellläufe	2,7	0,352	1,1	1,1
1,5 °C bei 50 % der Modellläufe	4,4	0,352	1,9	1,7
1,5 °C bei 33 % der Modellläufe	7,7	0,352	3,3	3,1
2 °C mit 66 % Wahrscheinlichkeit	9,9	0,352	4,2	4,0
2 °C mit 50 % Wahrscheinlichkeit	11,2	0,352	4,7	4,5
2 °C mit 33 % Wahrscheinlichkeit	14,4	0,352	6,1	5,8
3 °C bei 66 % der Modellläufe	25,1	0,352	10,6	10,0
3 °C bei 50 % der Modellläufe	29,5	0,352	12,5	11,8
3 °C bei 33 % der Modellläufe	34,6	0,352	14,7	13,8

Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

Bricht man dieses Budget auf den Stromsektor anhand der heutigen Emissionen herunter, so können die deutschen Kraftwerke noch 4,0 bis 4,2 Gigatonnen emittieren (vgl. Tabelle 3).

2.2 Modellierung der Szenarien

Im zweiten Schritt der Untersuchung wurde verschiedene Szenarien entwickelt, die das ermittelte Budget von 4,0 bis 4,2 Gigatonnen nicht überschreiten. Die Szenarien wurden mit Hilfe der beiden Strommarktmodelle von Öko-Institut und Prognos berechnet. Der aufgespannte Szenarienraum umfasst verschiedene Abschaltzeiten von Kohlekraftwerken – auf Basis ihrer Lebensdauer nach 20, 25 und 30 Jahren – beginnend ab dem Jahr 2019.

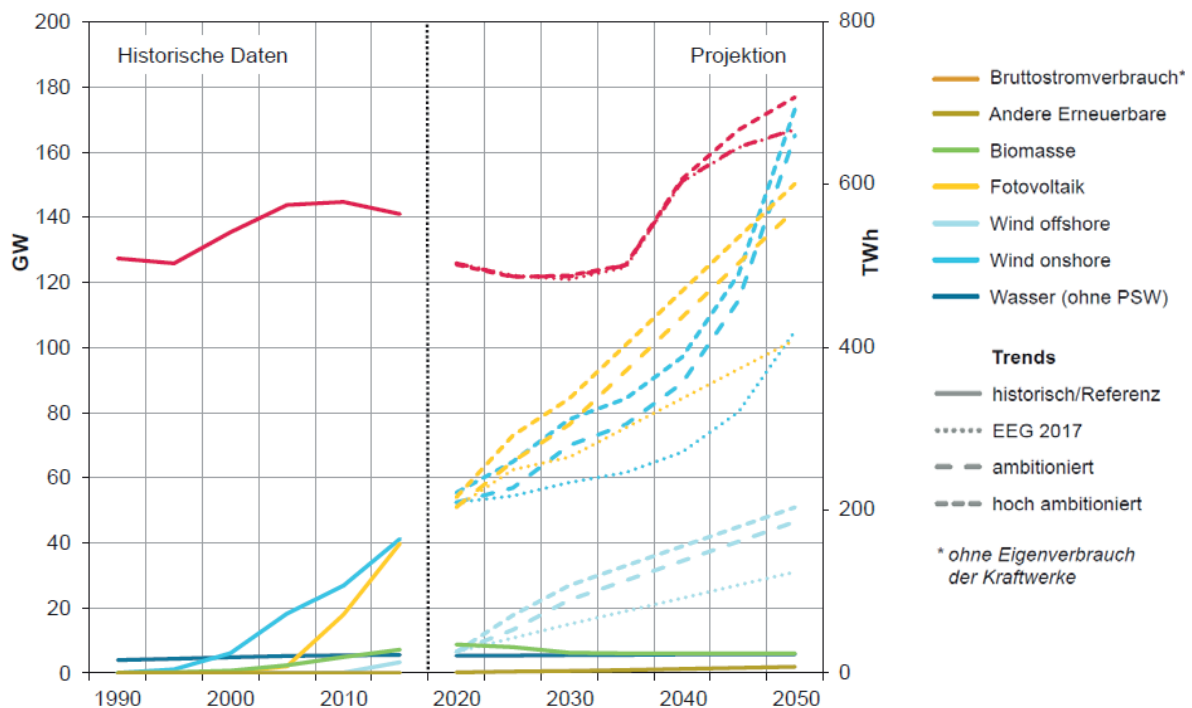
Diese drei Kohleausstiegsvarianten wurden dann jeweils kombiniert mit zwei verschiedenen Ausbaupfaden für erneuerbare Energien (vgl. Abbildung 2). Der erste Ausbaupfad (EEG 2017) berücksichtigt die Brutto-Versteigerungsmengen im EEG 2017 und die unterstellten Entwicklungen des Szenario B 2030 des genehmigten Szenariorahmens für den Netzentwicklungsplan 2030. Nach diesem Szenario steigt die installierte Leistung von Wind Onshore und Offshore auf 59 bzw. 15 GW im Jahr 2030. PV erreicht eine Kapazität von etwa 66 GW. Im zweiten Pfad (ambitioniert) wird ein schnellerer Ausbau unterstellt – mit 70 GW Wind Onshore, 22 GW Wind Offshore und 76 GW PV im Jahr 2030.

Darüber hinaus wurde ein dritter Pfad betrachtet (hoch ambitioniert), welcher die Obergrenze dessen beschreibt, was aktuell aufgrund von Netzrestriktionen und technischer Umsetzbarkeit möglich ist. Hier steigen die Kapazitäten von Wind Onshore auf 78 GW, von Wind Offshore auf 27 GW und von PV auf 84 GW. Dieser dritte Pfad wurde kombiniert mit einem Kohleausstiegsszenario (Schnellausstieg), in welchem alle Kohlekraftwerke in Deutschland bis Anfang 2025 sukzessive auf Basis ihres Inbetriebnahmejahrs abgeschaltet werden.

Zudem wurde ein sogenanntes Transformationsszenario entwickelt. Diese unterstellt folgenden Maßnahmen:

- Auslaufen der Kohleverstromung bis zum Jahr 2035: Damit erreiche alle Kraftwerksblöcke, bis auf Datteln 4, ein technisches Lebensalter von mindestens 20 Jahren. Zudem erfolgt das Auslaufen der Kohleverstromung vor der erwarteten Zunahme des Stromverbrauchs aufgrund der steigenden Elektrifizierung im Wärmebereich und im Verkehr.
- Maximale Betriebsdauer von 30 Jahren für Kohlekraftwerke
- Einführung einer CO₂-Optimierung ab dem 21. Betriebsjahr auf Basis des britischen Emissions Performance Standards (EPS) in Höhe von 3,35 t CO₂ je Kilowatt Kraftwerksleistung. Dieses führt bei Kohlekraftwerken zu einer Reduzierung der Volllaststunden. Gaskraftwerke sind durch die Maßnahme nicht betroffen.
- Ausbau der erneuerbaren Energien auf Basis des ambitionierten Ausbaupfads.

Abbildung 2: Bruttostromverbrauch und Erzeugung aus erneuerbaren Energien: historisch und Entwicklung in den Szenarien



Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

Um ein möglichst robustes Ergebnis zu erzielen, wurden darüber hinaus einzelne Eingangsparameter variiert, wie z.B. Brennstoff- und CO₂-Preise. Tabelle 4 zeigt zwei in der Modellierung unterstellten Pfade: Ein Pfad mit herausfordernden Rahmenbedingungen für den Klimaschutz. Das heißt, die Preise für Kesselkohle und Erdgas sind im Vergleich zu den CO₂-Preisen vergleichsweise hoch. Sowie ein Pfad mit für den Klimaschutz förderlichen Bedingungen: hier führen niedrigere Kohle- und Erdgaspreise bei gleichzeitig höheren CO₂-Preisen zu einer zunehmenden Unwirtschaftlichkeit von Kohlekraftwerken.

Tabelle 4: Annahmen zu Brennstoff- und CO₂-Preisen

		Ist	Projektion						
		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Herausfordernde Rahmenbedingungen für den Klimaschutz									
CO ₂ -Emissionsrechte	€/EUA	7,1	10,0	20,0	30,0	40,0	47,0	54,0	60,0
Steinkohle	€/MWh (Hu)	7,5	9,4	10,3	11,1	11,7	13,1	13,8	14,2
Erdgas	€/MWh (Hu)	13,8	22,3	24,9	27,8	31,4	36,1	38,5	39,6
Schweröl	€/MWh (Hu)	21,2	30,6	36,0	42,6	49,2	56,7	60,5	62,3
Braunkohle									
Grenzkosten	€/MWh (Hu)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Vollkosten	€/MWh (Hu)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Förderliche Rahmenbedingungen für den Klimaschutz									
CO ₂ -Emissionsrechte	€/EUA	7,1	10,0	22,5	35,0	47,5	60,0	66,3	69,4
Steinkohle	€/MWh (Hu)	7,5	7,7	8,2	8,3	8,1	8,4	8,6	8,6
Erdgas	€/MWh (Hu)	13,8	16,0	17,9	18,8	19,1	19,9	20,3	20,5
Schweröl	€/MWh (Hu)	21,2	21,5	24,4	26,7	27,9	29,2	29,9	30,2
Braunkohle									
Grenzkosten	€/MWh (Hu)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Vollkosten	€/MWh (Hu)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

3 Ergebnisse

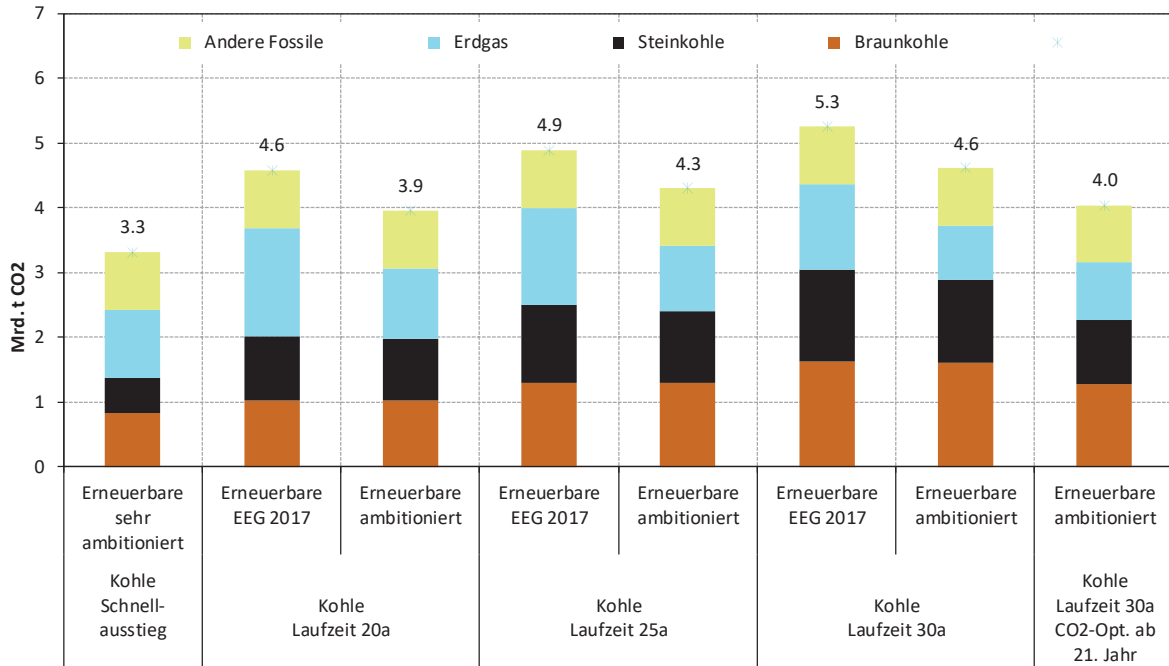
Die Auswertung der Szenarien zeigt (vgl. Abbildung 3), dass nur in drei der acht modellierten Szenarien das vorgegebene Emissionsbudget von 4,0 bis 4,2 Gigatonnen CO₂ eingehalten werden kann: im Szenario mit einem Schnellausstieg aus der Kohleverstromung (3,3 Gigatonnen CO₂), im Szenario mit einer Laufzeit der Kohlekraftwerke von 20 Betriebsjahren und einem ambitioniertem Ausbau erneuerbarer Energien (3,9 Gigatonnen CO₂) sowie im Transformationspfad (4,0 Gigatonnen CO₂).

Die ersten beiden Szenarien haben den Nachteil, dass hier der Kohlekapazitäten relativ zügig vom Markt gehen. Zudem muss im Szenario mit Kohle-Schnellausstieg ein sehr ambitionierter Ausbau von erneuerbaren Energien erfolgen, der an der technischen Obergrenze liegt.

Das Transformationsszenario hat den Vorteil, dass hier die Kohlekapazitäten vergleichsweise lange am Netz bleiben und damit zur Versorgungssicherheit beitragen. Dieses gilt vor allem in den ersten Jahren zwischen 2020 und 2030. Durch die Begrenzung der Volllaststunden bei Kohlekraftwerken können die Emissionen trotzdem reduziert werden.

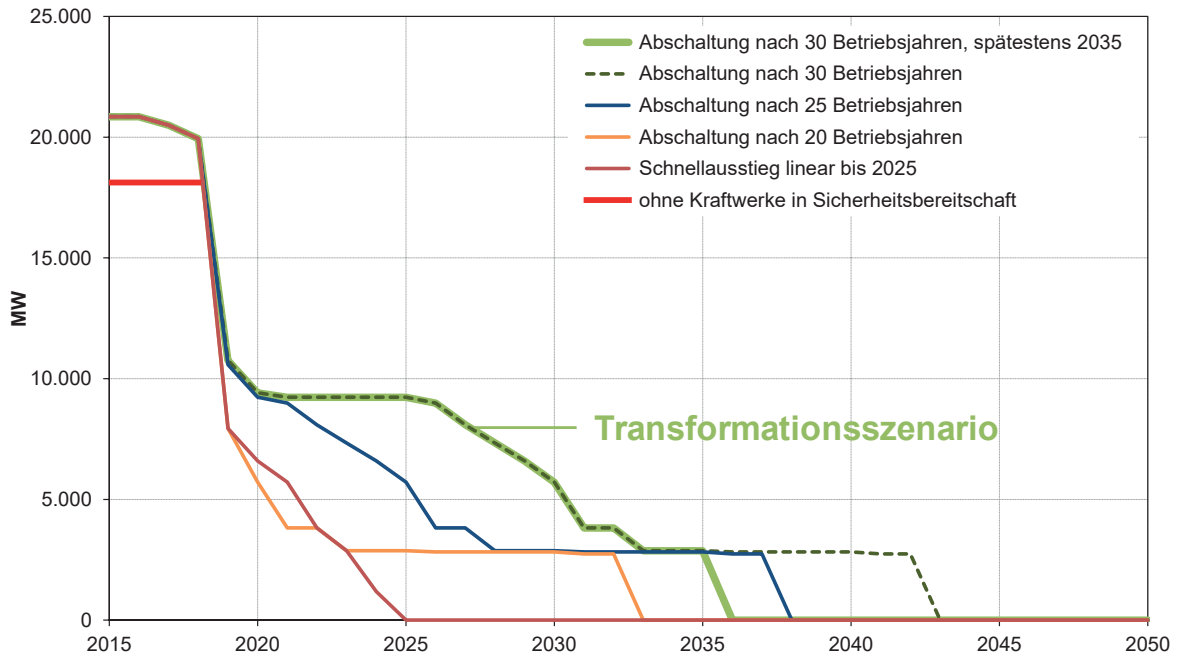
Für alle Szenarien gilt, dass die fehlenden Kapazitäten durch geeignete Maßnahmen ausgeglichen werden müssen, wie z.B.: Zubau von Gaskraftwerken, Kontrahierung von gesicherter Leistung im Ausland.

Abbildung 3: Kumulierte Emissionen von 2015 bis 2050 für die verschiedenen Szenarien



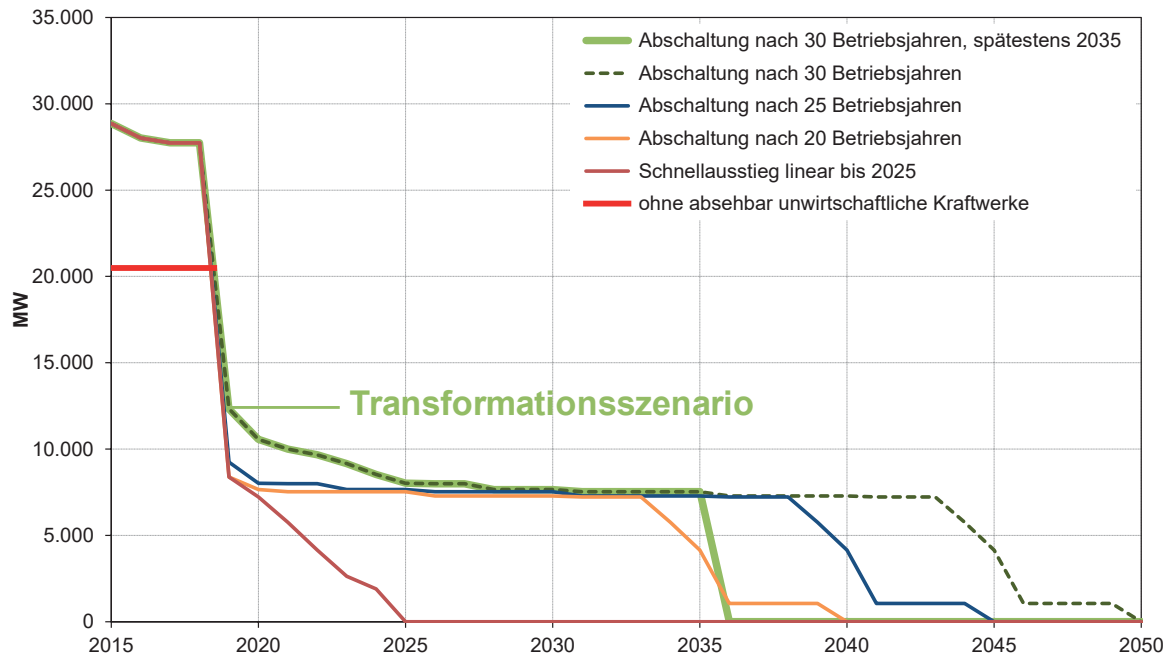
Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

Abbildung 4: Entwicklung der Braunkohleleistung in den Szenarien



Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

Abbildung 5: Entwicklung der Steinkohleleistung in den Szenarien



Quelle: Öko-Institut & Prognos 2017

4 Fazit

Wenn man die Klimaziele von Paris ernst nimmt, dann reichen Treibhausgassenkungsziele für einzelne Stichjahre nicht aus. Es müssen die kumulierten Emissionen über die Zeit betrachtet werden und folglich Emissionsbudgets als Ziele festgelegt werden. Wie hoch faire Budgets für die einzelnen Länder sind, muss international diskutiert und verhandelt werden. Hier stellt sich insbesondere die Frage nach der historischen Verantwortung – folglich ob historische Emissionen in das Budget eingerechnet werden.

Strebt man das 2°C-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 66% an, und würde man die Emissionen anhand der aktuellen Bevölkerung auf die einzelnen Länder schlüsseln, so stünde Deutschland ab dem Jahr 2015 – ohne die Betrachtung historischer Emissionen – insgesamt ein Budget von rund 10 Gigatonnen zur Verfügung. Aktuell betragen die jährlichen Emissionen rund 0,9 Gigatonnen. Das heißt, ohne weitere Maßnahmen wäre das Budget nach 12 Jahren vollständig aufgebraucht. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass man vergleichsweise leicht umsetzbare Maßnahmen schnellstmöglich realisiert, um Budget für spätere Jahre aufzusparen.

Für den Stromsektor wurde in dieser Untersuchung ein Transformationsszenario aufgezeigt, dass möglichst lange die Kraftwerkskapazitäten am Netz hält und gleichzeitig das berechnete Emissionsbudget von rund 4 Gigatonnen für den deutschen Stromsektor einhält.

Die erste Maßnahme ist die Begrenzung der Lebensdauer von Kohlekraftwerke auf 30 Jahre. Als zweite Maßnahme muss die Kohleverstromung im Jahr 2035 auslaufen. Als dritte Maßnahme dürfen Kohlekraftwerke, die älter als 20 Jahre sind, nur eine begrenzte Menge an Emissionen ausstoßen. Dieses Budget beträgt 3,35 t CO₂ je Kilowatt Kraftwerksleistung. Als

vierte Maßnahme muss der Ausbau der erneuerbaren Energien deutlich schneller erfolgen, als es aktuell im Erneuerbaren Energien-Gesetz (EEG) vorgesehen ist. Erdgaskraftwerke würden vor allem zur Leistungsabsicherung beitragen. Eine starke Zunahme der Stromerzeugung aus Erdgas würde zu einer Zielverfehlung führen.

Aus dem dargestellten Transformationspfad für den deutschen Stromsektor ergibt sich ein weiterer Forschungsbedarf: Zum einen müssen die vorhandenen Instrumente zur Sicherung der Systemstabilität und Versorgungssicherheit überprüft werden. Des Weiteren müssen die regionalwirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen eines beschleunigten Kohleausstiegs umfangreich untersucht und berücksichtigt werden.

Darüber hinaus ergibt sich mit der Verfolgung des Budgetansatzes die Frage, wie die anderen Sektoren zielgerecht dekarbonisiert werden können und wie die Budgets zwischen den Sektoren optimal aufgeteilt werden können.

Literaturverzeichnis

- IPCC 2013 Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2013 – Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- Öko-Institut 2017 Klimaschutz im Stromsektor 2030 – Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung, im Auftrag des Umweltbundesamtes
- Öko-Institut & Prognos 2017 Zukunft Stromsystem – Kohleausstieg 2035, im Auftrag des WWF Deutschland