



Im Auftrag des Umweltbundesamtes

AGEE-Stat-Workshop

Aktuelle Entwicklungen in der Energiestatistik und Emissionsbilanzierung der erneuerbaren Energien

Projekt SeEiS – Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im Stromsektor

Modellierung der Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im deutschen und europäischen Stromsektor und ihrer Auswirkungen auf die Emissionsbilanzierung erneuerbarer Energieträger

Robert Kunze

ESA² GmbH

Dessau-Roßlau, 26. November 2019

Modellierung der Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im deutschen und europäischen Stromsektor und ihrer Auswirkungen auf die Emissionsbilanzierung Erneuerbarer Energieträger

Auftraggeber: Umweltbundesamt, FKZ 37EV 16 126 0

**Auftragnehmer: ESA² GmbH
TU Dresden
TEP Energy GmbH
Karlsruher Institut für Technologie**

Laufzeit: Mai 2017 bis März 2020

Arbeitspakete:

AP I – Methodik der Modellierung und Datenbasis

AP II – Erarbeitung der Alternativszenarien

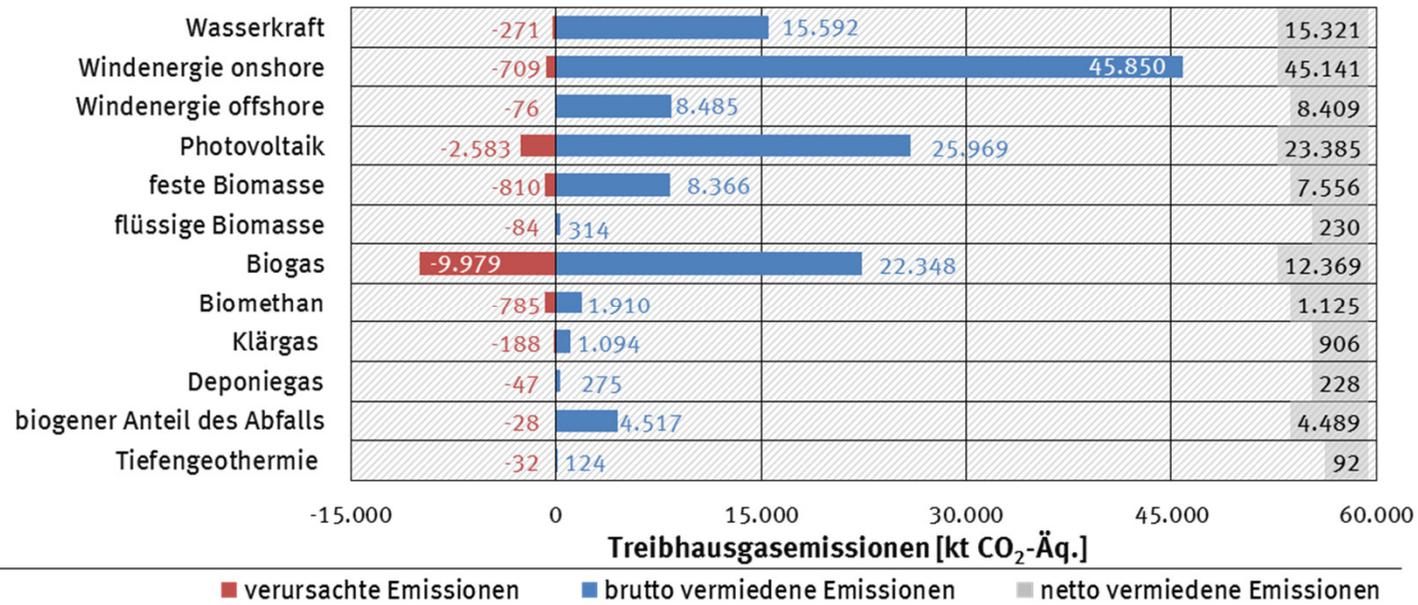
AP III – Modellierung und Ermittlung der Substitutionseffekte in der Zeitreihe

AP IV – Berichterstattung und Projektbesprechungen

Hintergrund SeEiS-Projekt

Emissionsbilanz der erneuerbaren Energien für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

Emissionsbilanz für den Stromsektor:



- Bisher basierend auf ex-post Strommarktdaten der Vorjahre mit beschränktem Blick auf Deutschland
- Zunehmender Einfluss der steigenden EE-Stromerzeugung auf die deutsche Strom-Außenhandelsbilanz
- Überarbeitung der Methodik zur Herleitung der Substitutionseffekte

Ziele SeEiS-Projekt

Übergeordnet:

Analyse und Quantifizierung der Substitutionseffekte 2013 bis 2018 im Bereich der in- und ausländischen Stromerzeugung durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger (EE) in Deutschland

Konkretisiert:

- Jahres-, länder- und energieträgerscharfe Ausweisung der Substitution von EU-weiter konventioneller Stromerzeugung durch die EE-Stromerzeugung in Deutschland
- Einflüsse innerdeutscher Netzengpässe und der Interkonnectoren
- Wirkung von Stromspeichern im In- und Ausland
- Identifikation/Charakterisierung saisonaler/tageszeitlicher Muster und Extremsituationen

Methodisch:

- Modellgestützte Bestimmung eines plausiblen kontrafaktischen Szenarios für die Entwicklung der konventionellen Stromerzeugungskapazitäten ohne den Ausbau von EE-Technologien in Deutschland
- Transparente Analyse und robuste Quantifizierung der Substitutionseffekte
- Anschlussfähigkeit/Fortschreibung der Zeitreihen ist zu gewährleisten

Agenda

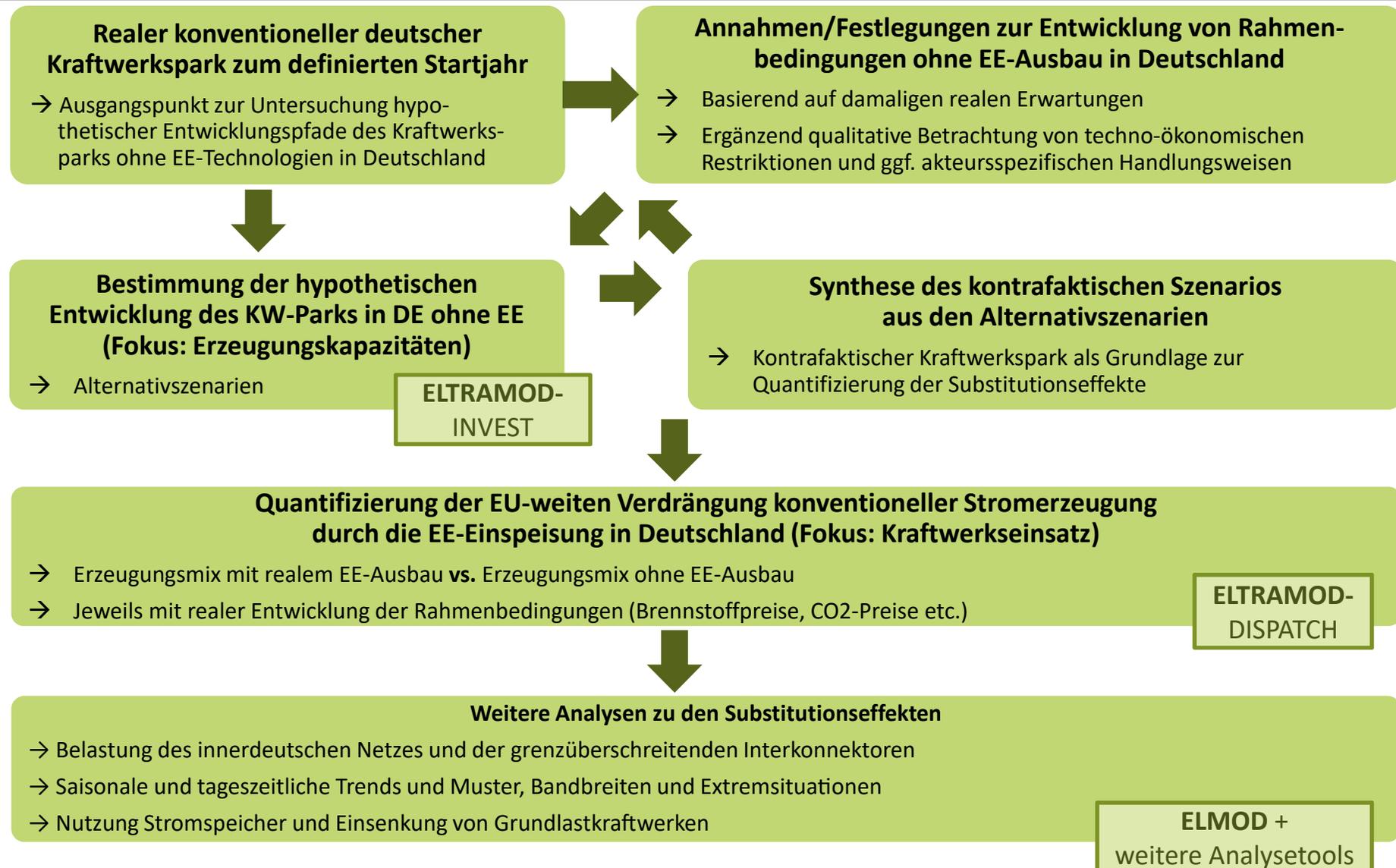
- Überblick zum methodischen Umsetzungskonzept
- Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks ohne EE-Technologien
- Quantifizierung der EU-weiten Substitutionseffekte durch die deutsche EE-Stromerzeugung

Methodisches Umsetzungskonzept

- Überblick zur Vorgehensweise
- Kurzvorstellung der Modellierungswerkzeuge

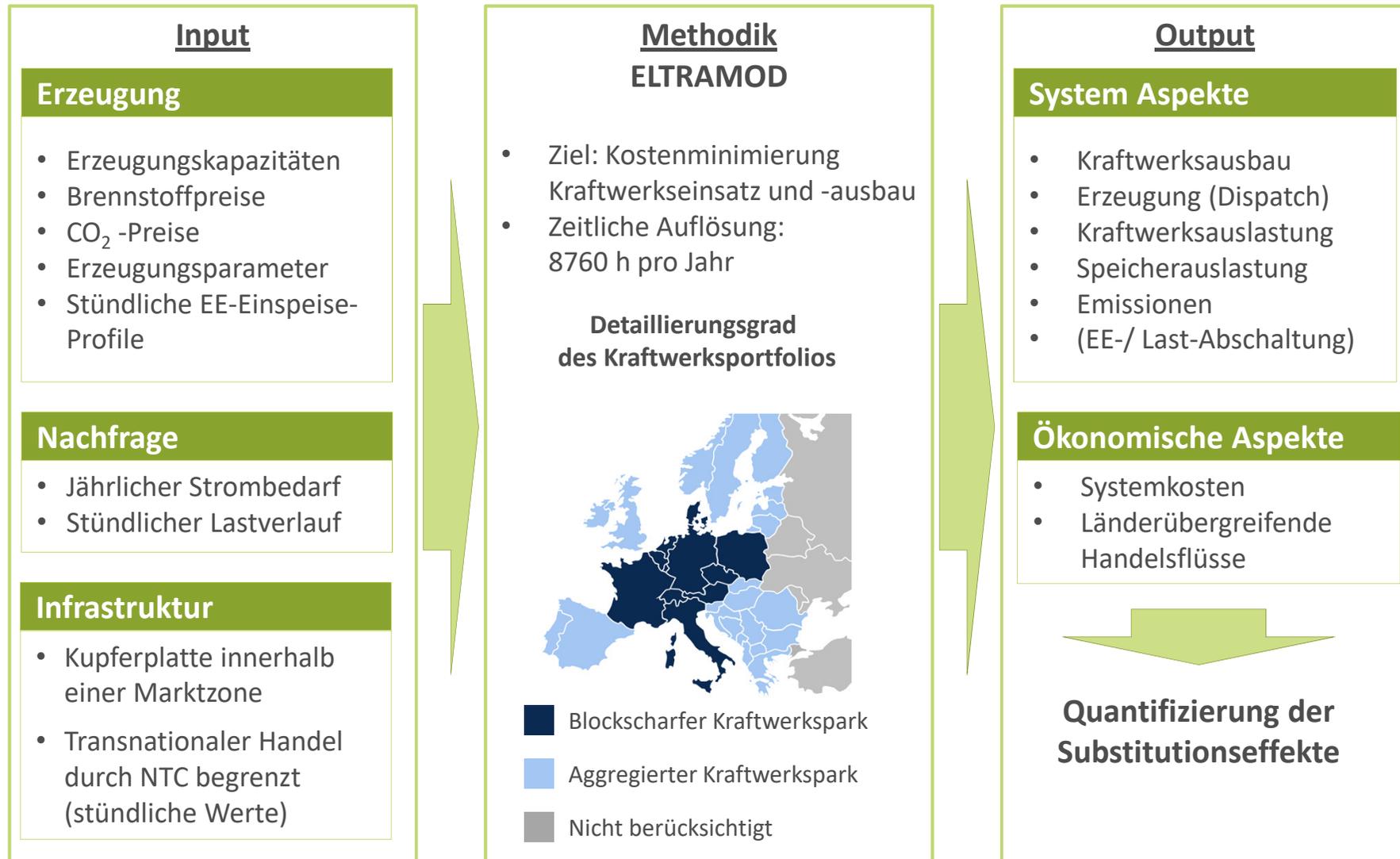
Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

Überblick zur Vorgehensweise



Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

Modellierungswerkzeuge: Umfang und Darstellung ELTRAMOD



Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

Modellierungswerkzeuge: ELTRAMOD-INVEST und ELTRAMOD-DISPATCH

	ELTRAMOD-INVEST	ELTRAMOD-DISPATCH
Fokus	<ul style="list-style-type: none">• <u>Kraftwerksausbau</u> in Deutschland für den kontrafaktischen Fall	<ul style="list-style-type: none">• <u>Kraftwerkseinsatz</u> in der EU zur Bestimmung der Substitutionseffekte
Spezifische Charakteristika	<ul style="list-style-type: none">• Myopische Modellierung des Kraftwerkszubaues in Deutschland• Berechnung des Zubaues und der Stilllegungen unter Berücksichtigung von realisierten und geplanten Projekten	<ul style="list-style-type: none">• Ermittlung des stündlichen Kraftwerks- und Speichereinsatzes im In- und Ausland• Identifizierung von tageszeitlichen und saisonalen Trends und Mustern

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

- Grundsätzliche Festlegungen
- Verwendete Datenbasis
- Alternativszenarien und Ergebnis der Synthese des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Grundsätzliche Festlegungen

Mit Ausnahme des EE-Ausbaus im Stromsektor bleiben die politischen Zielsetzungen und Vorgaben bleiben unverändert.

Die hypothetische Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks ohne EE-Technologien wird ausgehend vom Jahr 2006 betrachtet.

2006 vorhandene Wasserkraftwerke (ca. 4 GW) werden durch Steinkohle-Erzeugungskapazitäten substituiert. Sonstige EE-Erzeugungskapazitäten werden vernachlässigt.

Die Betrachtung der hypothetischen Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks beschränkt sich auf Steinkohle-, Gas- und Öl-Erzeugungskapazitäten.

Für die Bestimmung der hypothetischen Kraftwerkskapazitäten wird der Stromaustausch über die grenzüberschreitenden Interkonnektoren vernachlässigt.

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Datenverfügbarkeit zum realen Kraftwerkspark in Deutschland (blockscharf) von 2006 bis 2015

Quelle	Stand	KW-Typen	in Betrieb	neue Inbetriebnahmen	Stilllegungen vorläufig / endgültig	Reserve-KW / Sicherheitsbereitschaft / Sonderfall	Bau / Planung	Probebetrieb	Genehmigung erteilt / im Verfahren	Voraussichtl. Inbetriebnahme	Stilllegung oder Baustopp erwartet
BNetzA	Feb 14	alle	x	x	x	x	x			x	x
	Okt 14	alle	x	x	x	x	x			x	x
	Mai 16	alle	x	x	x	x	x			x	x
	Mrz 17	alle	x	x	x	x	x			x	x
BET	Sep 06	konv. KW		x							
BDEW	Apr 08	alle					x	x	x	x	
	Mai 13	alle					x	x	x	x	
	Apr 15	alle					x	x	x	x	
	Mai 16	alle					x	x	x	x	
	Apr 17	alle					x	x	x	x	
DAF/VBG	Feb 17	AKW	x	x	x						
UBA	2017	alle	x								
BUND	Sep 16	Kohle-KW		x			x	x	x	x	x
DUH	Dez 09	Kohle-KW					x	x	x	x	x

- keine Dokumentation zu Stilllegungen vor 2011 (außer für Kernkraftwerke)
- nach Rücksprache mit der BNetzA und dem BDEW nur wenige Stilllegungen vor 2011

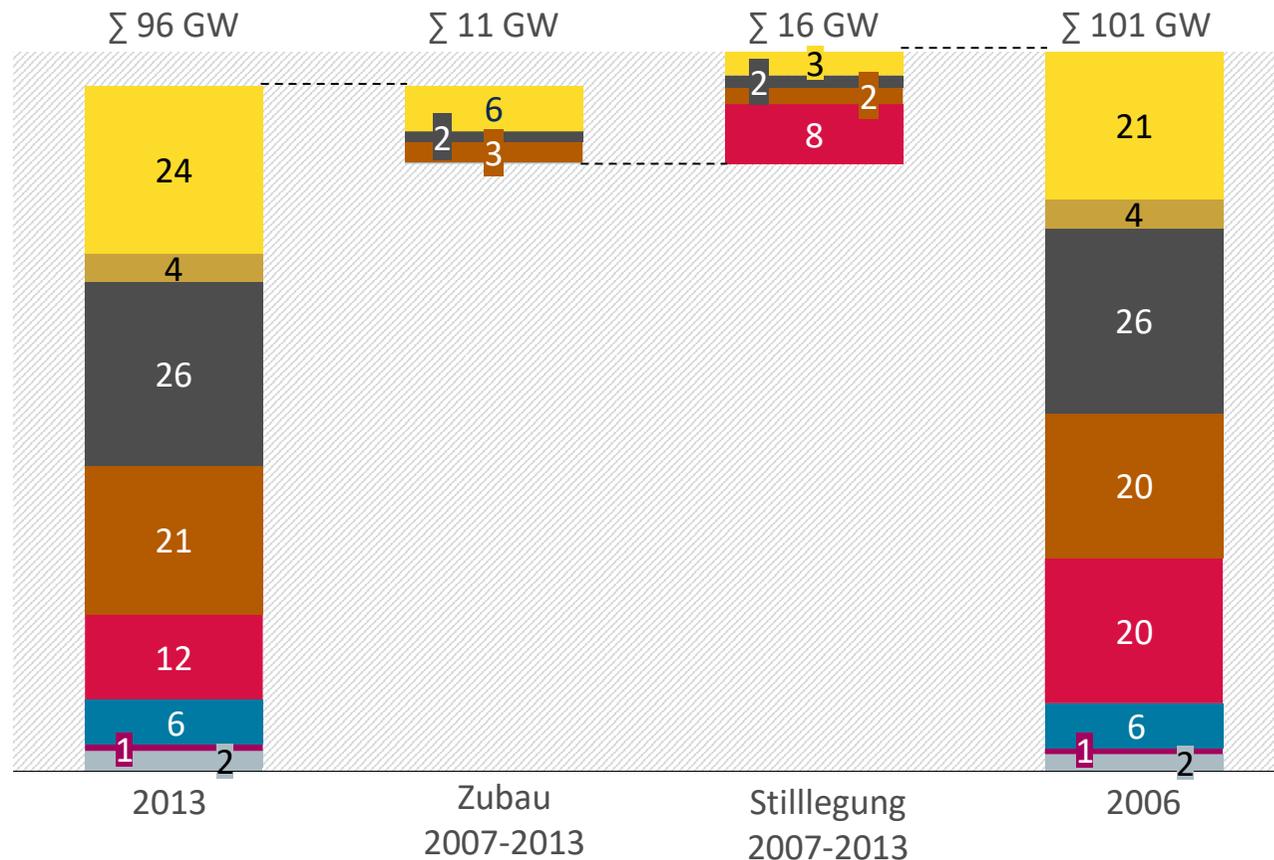
BNetzA Bundesnetzagentur
 BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH
 BDEW Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft e. V.
 UBA Umweltbundesamt

BUND BUND für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V.
 DUH Deutsche Umwelthilfe e. V.
 DAF Deutsches Atomforum e. V.
 VGB VGB Power Tech GmbH

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Ermittlung des deutschen Kraftwerksparks 2006

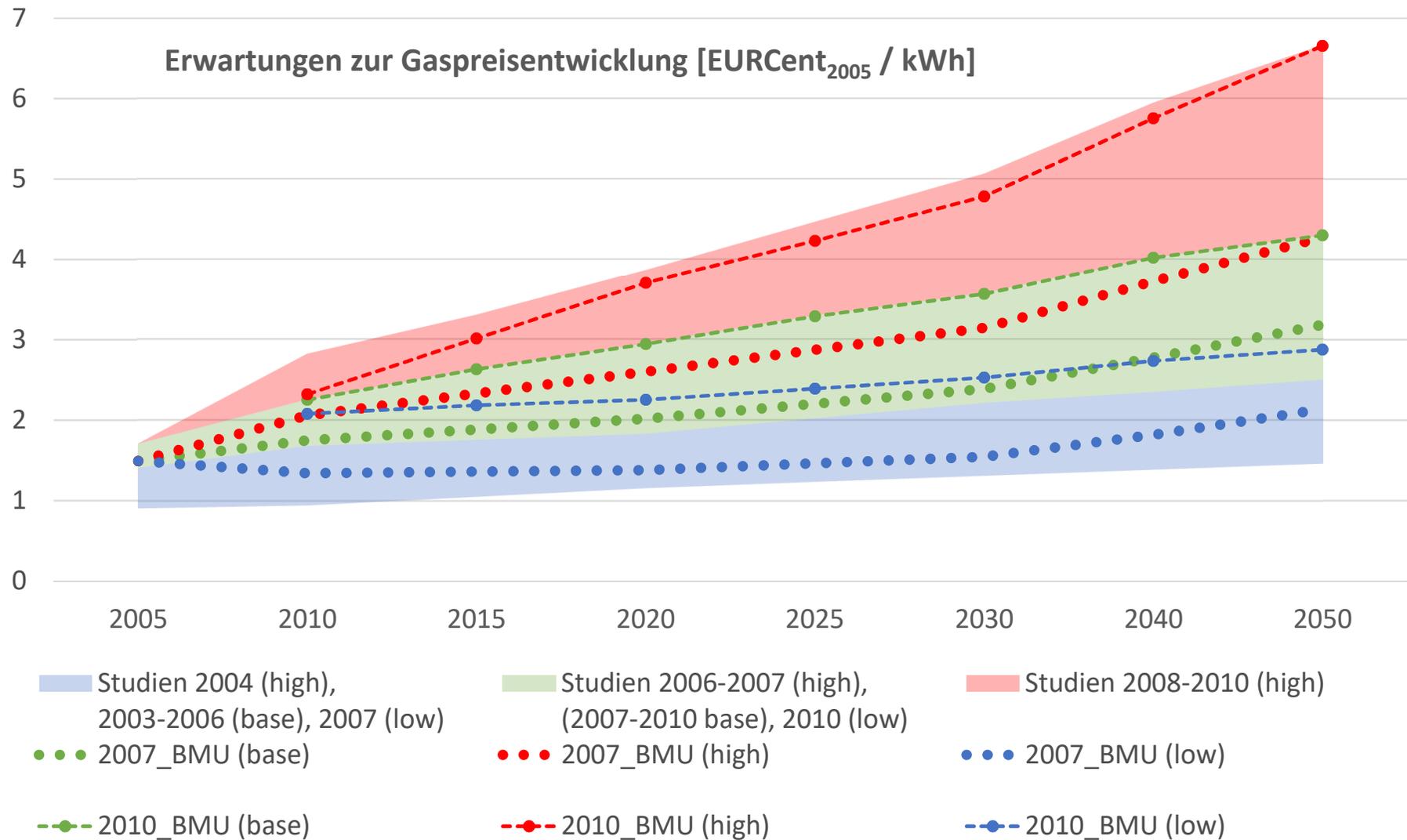
Reproduktion der installierten konventionellen Erzeugungskapazitäten für 2006 ausgehend vom Kraftwerkspark 2013 und den bekannten Inbetriebnahmen und Stilllegungen 2007 bis 2013



Quelle: Basierend auf Daten der Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur [BNetzA_2014b, BNetzA_2014c, BNetzA_2016b, BNetzA_2017b]

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

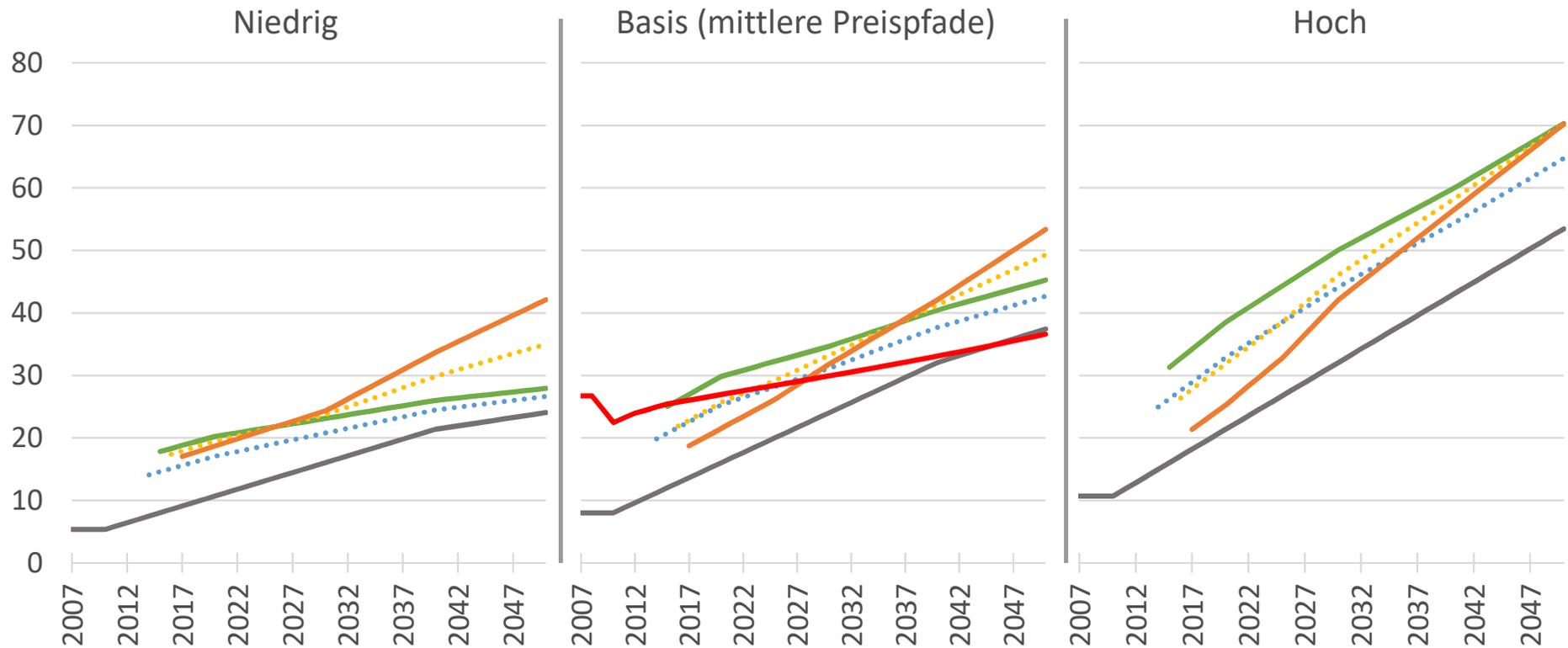
Damals erwartete Entwicklung von Rahmenbedingungen (aus Studien 2003 - 2010)



Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Datenbasis für die Alternativszenarien – CO₂-Preis

Entwicklung CO₂-Preis [EUR₂₀₀₅/EUA]



- Erwartungen 2007 (BMU_2007)
- Erwartungen 2010 (BMU_2010)
- Erwartungen 2012 (BMU_2012)
- ⋯⋯⋯ Erwartungen 2009 (BMU_2007 und BMU_2010)
- ⋯⋯⋯ Erwartungen 2011 (BMU_2010 und BMU_2012)
- Erwartungen 2005 (Öko-Institut 2006)

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Berechnung von 17 Alternativszenarien – Variationen/Sensitivitätsanalysen

- Kombination verschiedener erwarteter **Brennstoff- und CO₂-Preisniveaus**
→ größere Sensitivitäten zeigen sich erst bei sehr hohen erwarteten Preisniveaus
- Abweichende Erwartungen zur **Nettostromnachfrage** (520 – 540 TWh/Jahr), **Länge des Planungshorizontes** (10 Jahre vs. 30 Jahre) und Variation der mittleren **Verfügbarkeiten** der installierten Erzeugungskapazitäten (85 – 90 %) → haben kaum Auswirkungen
- Große Unsicherheiten bzgl. **fiktiver Laufzeitverlängerungen** real erfolgter Stilllegungen

	Zubau/Inbetriebnahme	Stilllegung vs. Laufzeitverlängerung
Modellierungsansatz 1 (Standard)	Reale Zubauprojekte werden exogen vorgegeben, zusätzlich endogener Zubau fiktiver Kapazitäten möglich	Endogene Stilllegung realer Stilllegungsprojekte, kostenneutrale Laufzeitverlängerung ist möglich
Modellierungsansatz 2	Nur endogener Zubau fiktiver Erzeugungskapazitäten ist möglich	Exogene Vorgabe aller realen Stilllegungen (keine Laufzeitverlängerung möglich)

- Vorrangig kostenneutrale Laufzeitverlängerung von Gaskraftwerken
- Ohne Möglichkeit zur Laufzeitverlängerung vorrangig Zubau neuer Steinkohlekraftwerke
- Laufzeitverlängerung alter Steinkohlekraftwerke erscheint grundsätzlich wenig attraktiv

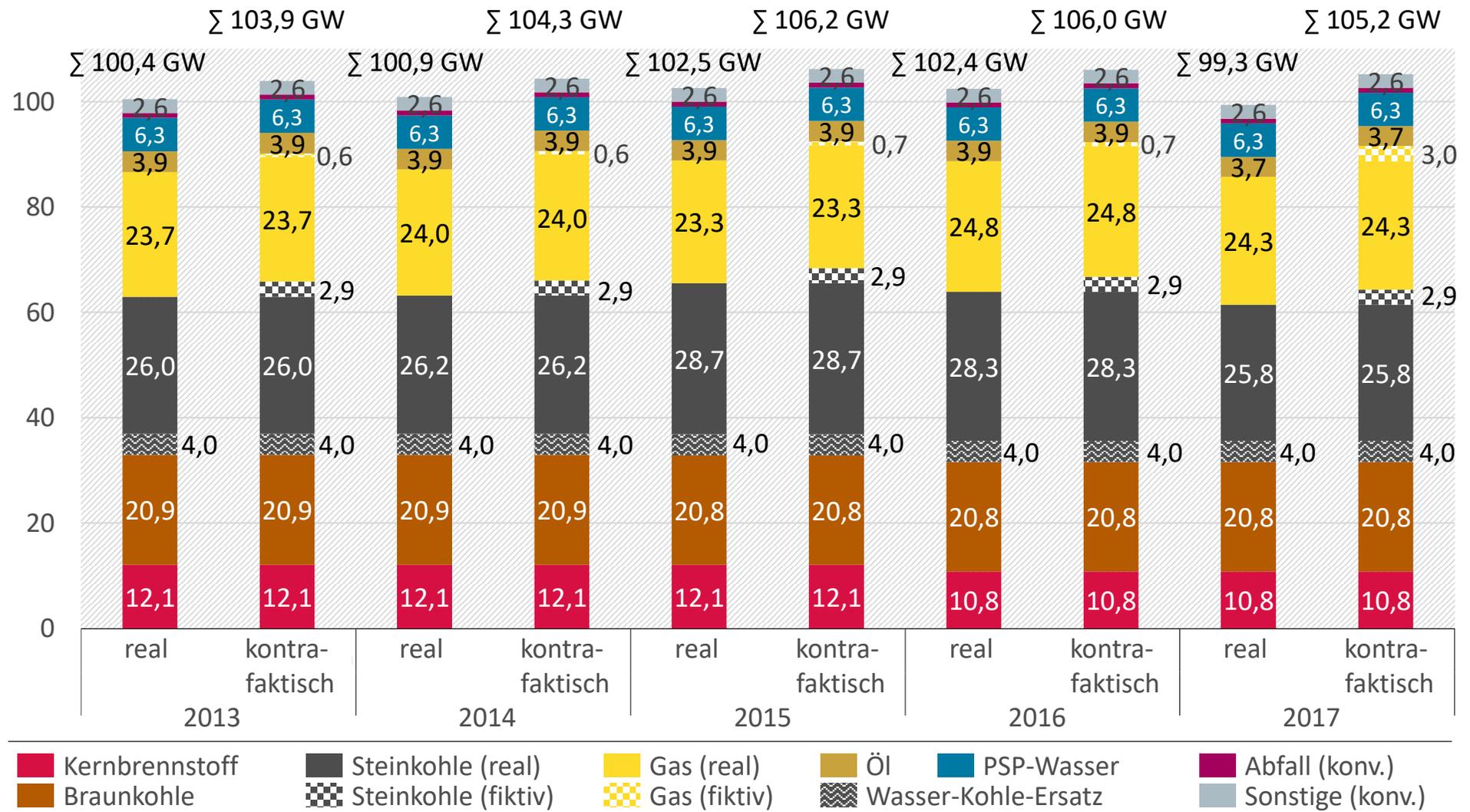
Annahmen/Festlegungen:

- Real erfolgte Stilllegungen von Kohlekraft 2007 bis 2013 wären auch ohne den EE-Ausbau erfolgt
- Für real stillgelegte Gaskraftwerke kostenneutrale Laufzeitverlängerung falls Nutzungsdauer <25 Jahre

Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Ergebnis der Synthese des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Installierte konventionelle Stromerzeugungskapazitäten in Deutschland 2013-2017 real und kontrafaktisch



Quantifizierung der Substitutionseffekte

- Überblick zur Methodik
- Ergebnisse

Quantifizierung der Substitutionseffekte

Überblick zur Methodik

- Bestimmung der Substitutionseffekte pro:
 - EE-Technologie
 - Konventionellem Energieträger
 - Land
- Analyse der Substitutionseffekte mit Strommarktmodell
ELTRAMOD-Dispatch
- Vergleichende Gegenüberstellung eines Modelllaufs mit EE (realer Fall) und eines Modelllaufs ohne EE (kontrafaktischer Fall) auf Basis von Realdaten für Brennstoffpreise, Nachfrage und CO₂-Zertifikate
- Kalibrierung der Rechenläufe für den realen Fall anhand tatsächlicher Erzeugungs-/Handelsdaten

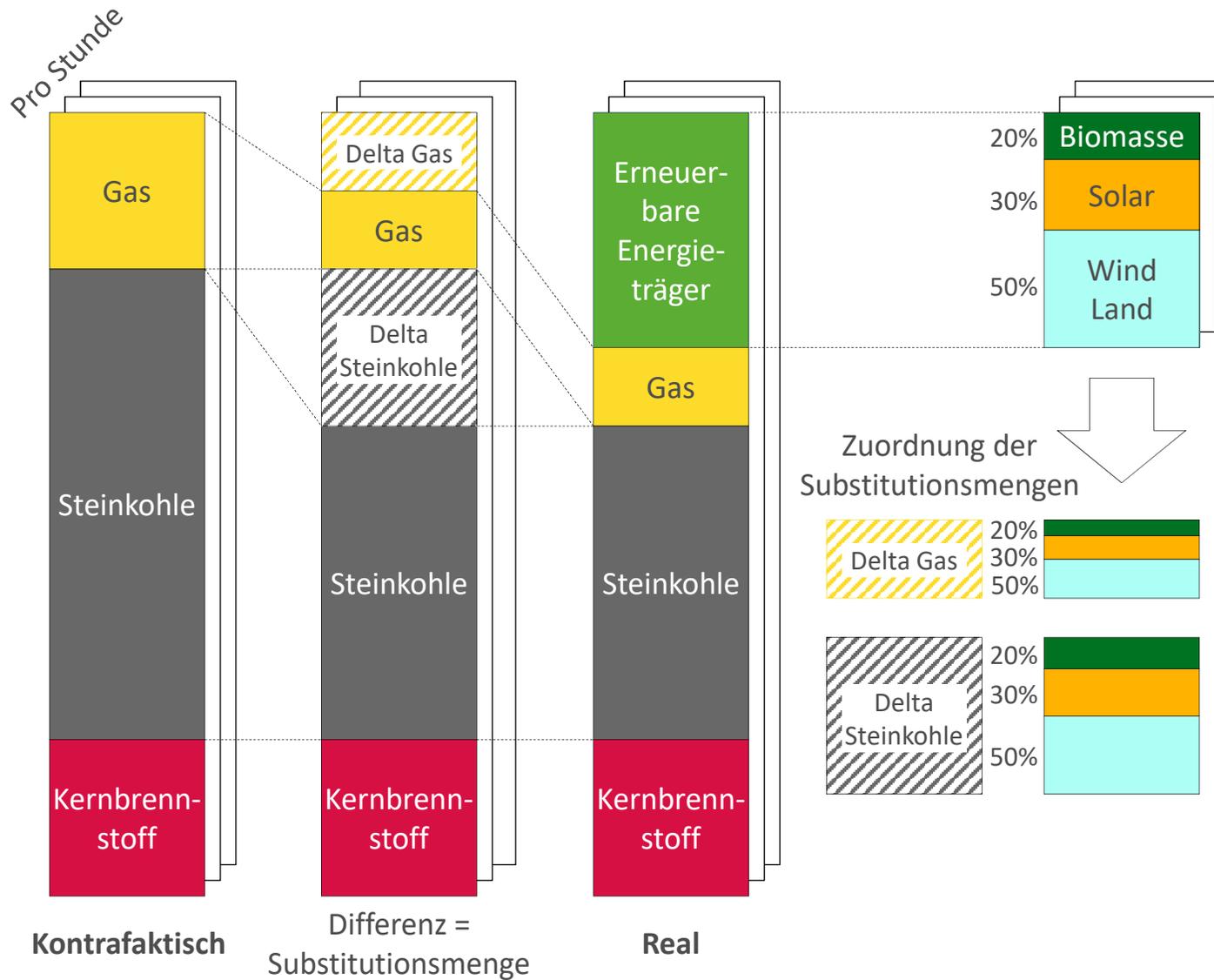
Einsatz EU-Kraftwerkspark



- blockscharf
- aggregiert
- nicht berücksichtigt

Quantifizierung der Substitutionseffekte

Überblick zur Methodik



Quantifizierung der Substitutionseffekte

Ergebnisse – Verdrängungsmatrix

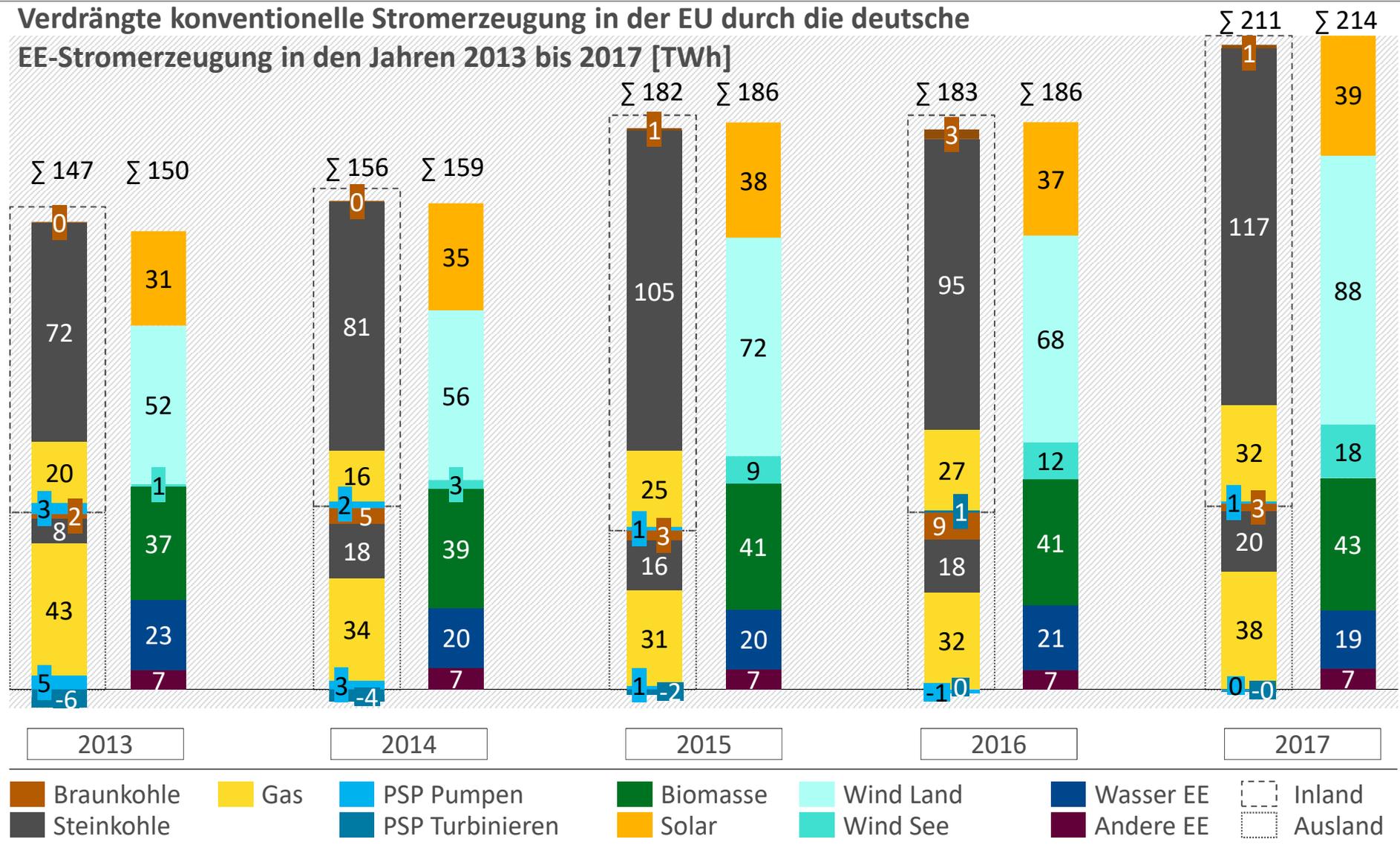
Verdrängte konventionelle Stromerzeugung in der EU durch die deutsche EE-Stromerzeugung im Jahr 2014 differenziert nach Energieträgern [TWh]

	Solar	Wind Land	Wind See	Bio-masse	Wasser EE	Abfall EE	Geo-thermie	Deponie-gas	Klärgas	Summe
Kernbrennstoff	0,05	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,1
Braunkohle	1,00	2,21	0,10	1,34	0,68	0,17	0,00	0,02	0,02	5,5
Steinkohle	18,09	35,56	1,95	26,38	13,13	3,32	0,07	0,30	0,41	99,2
Gas	14,54	15,57	0,84	11,59	5,89	1,46	0,03	0,13	0,18	50,2
Öl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Sonstige (konventionell)	0,01	0,05	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,1
PSP-Wasser (Turbinieren)	0,02	-1,69	-0,10	-1,32	-0,64	-0,17	0,00	-0,01	-0,02	-3,9
Steuerbare EE im Ausland	1,45	0,48	-0,11	-1,12	-0,56	-0,14	0,00	-0,01	-0,02	0,0
PSP-Wasser (Pumpen)	-0,03	2,26	0,14	1,76	0,86	0,22	0,00	0,02	0,03	5,3
Techn. Eigenverbrauch EE	0,00	1,09	0,04	0,32	0,27	1,24	0,00	0,00	0,00	3,0
Summe	35,1	55,6	2,9	39,0	19,6	6,1	0,1	0,4	0,6	159,4

Quantifizierung der Substitutionseffekte

Ergebnisse

Verdrängte konventionelle Stromerzeugung in der EU durch die deutsche EE-Stromerzeugung in den Jahren 2013 bis 2017 [TWh]



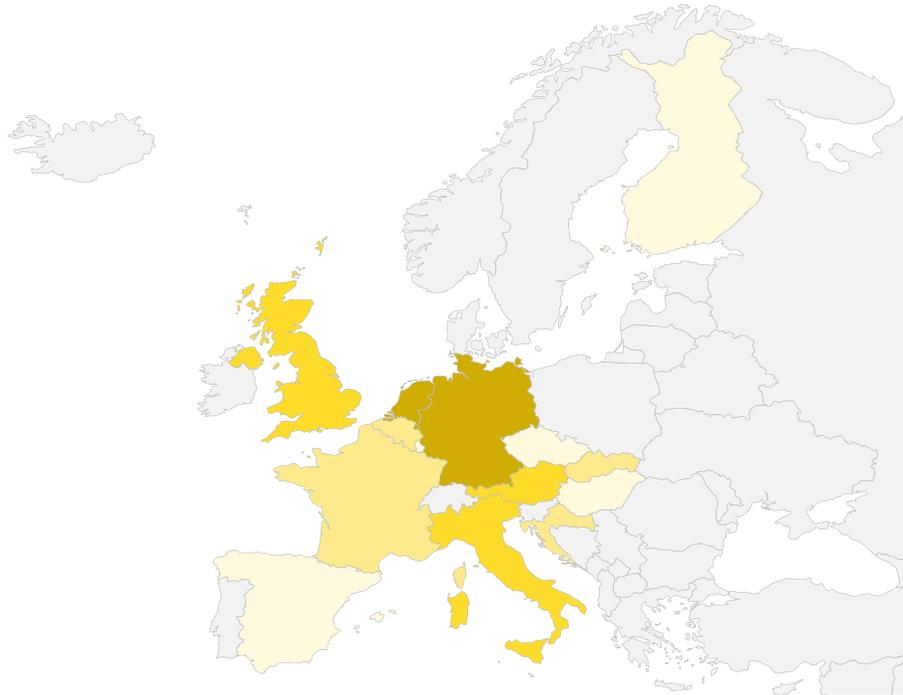
■ Braunkohle ■ Gas ■ PSP Pumpen ■ Biomasse ■ Wind Land ■ Wasser EE Inland
■ Steinkohle ■ PSP Turbinieren ■ Solar ■ Wind See ■ Andere EE Ausland

Quantifizierung der Substitutionseffekte

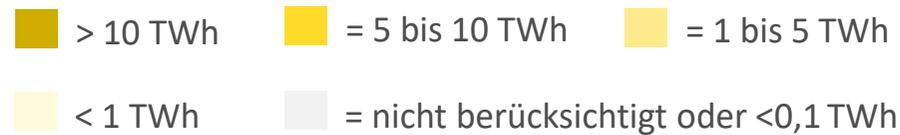
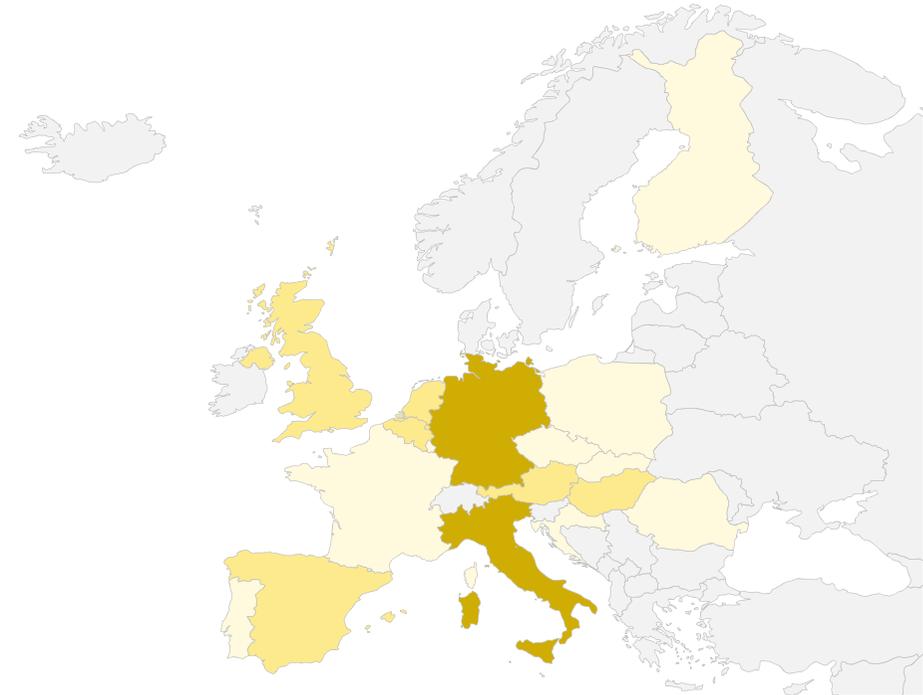
Ergebnisse

Verdrängte Stromerzeugung aus **Gas** durch die deutsche EE-Stromerzeugung [TWh]

2013



2017

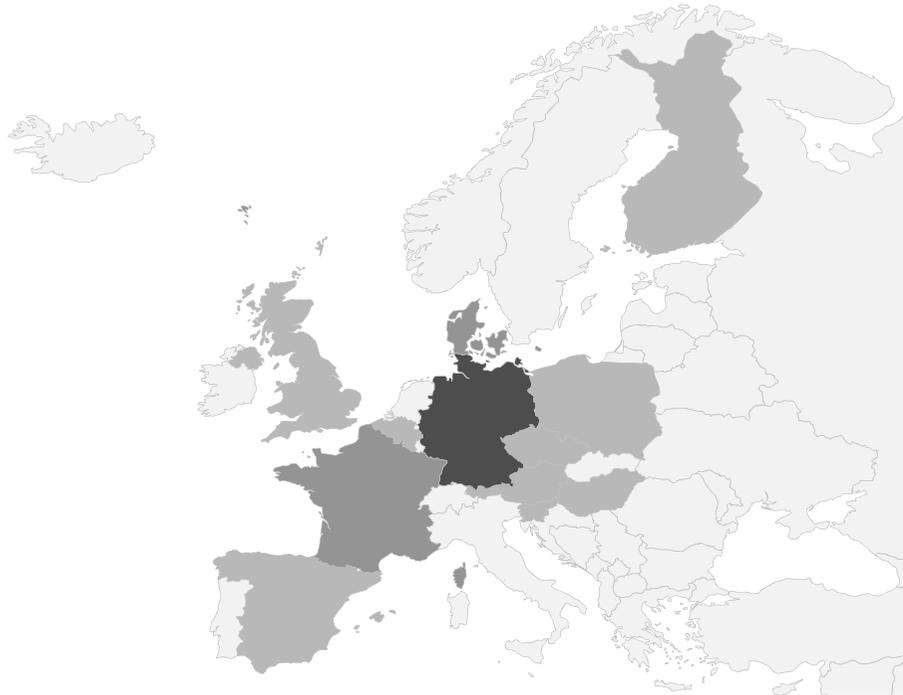


Quantifizierung der Substitutionseffekte

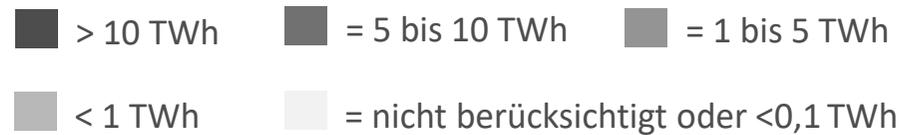
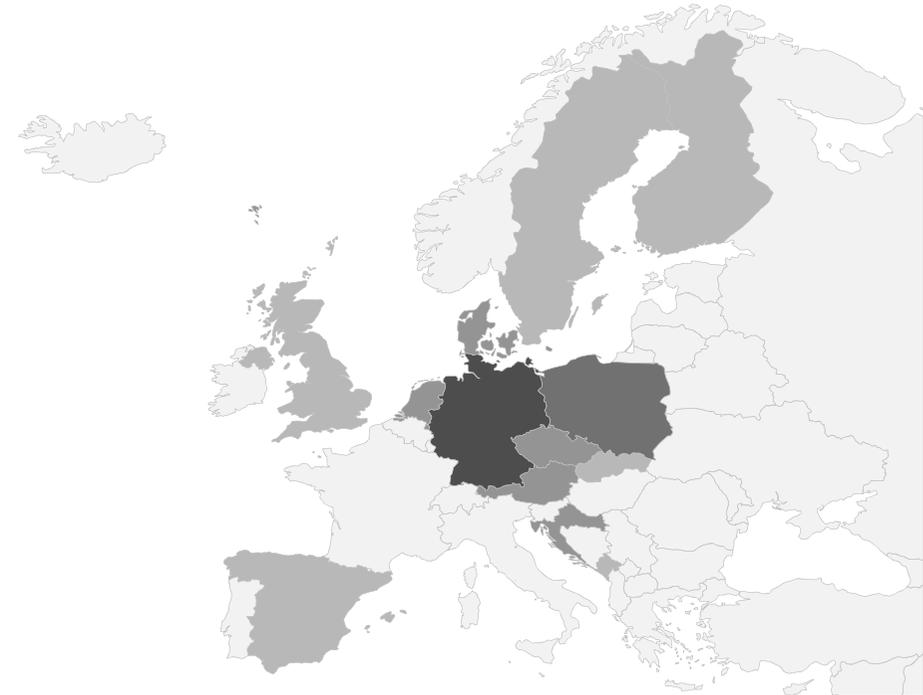
Ergebnisse

Verdrängte Stromerzeugung aus **Steinkohle** durch die deutsche EE-Stromerzeugung [TWh]

2013



2017

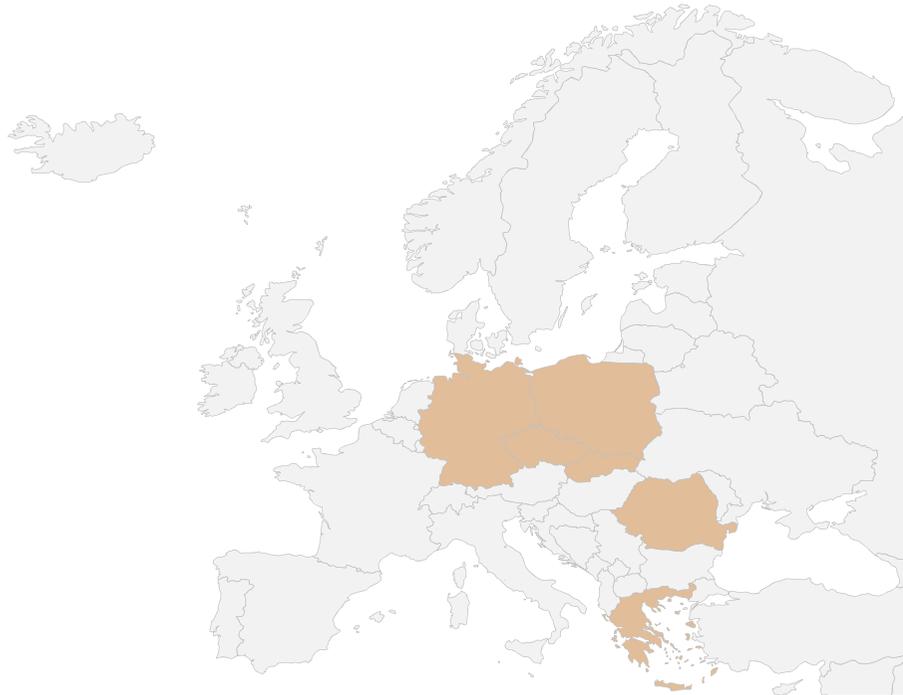


Quantifizierung der Substitutionseffekte

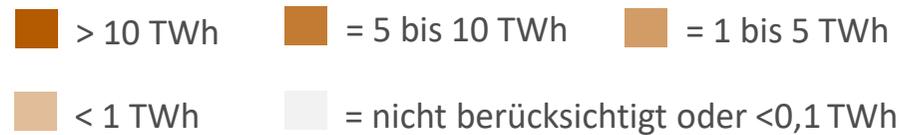
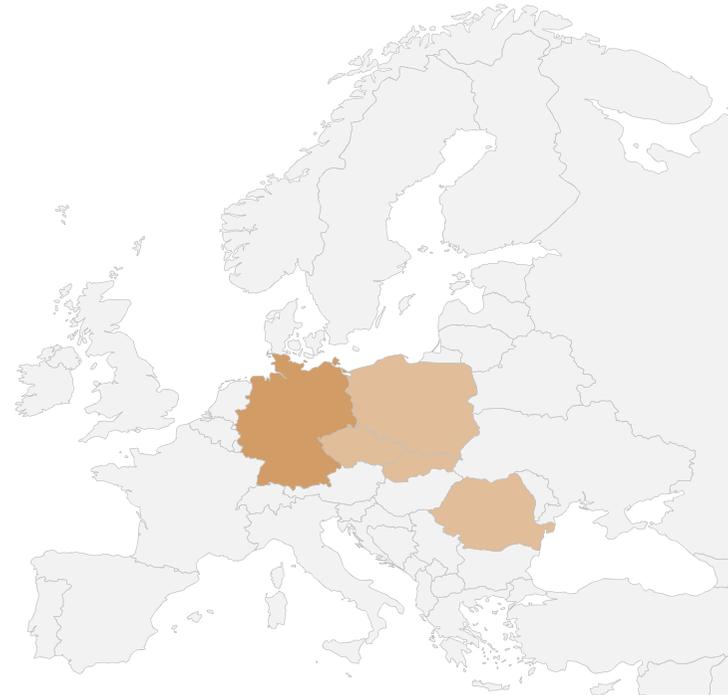
Ergebnisse

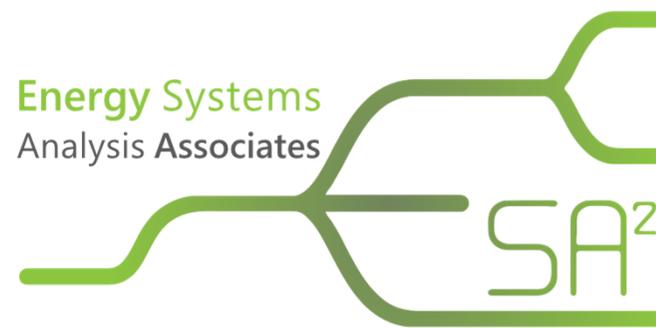
Verdrängte Stromerzeugung aus **Braunkohle** durch die deutsche EE-Stromerzeugung [TWh]

2013



2017





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Projekt SeEiS – Teilbericht Methodik und Daten (2019)

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projekt-seeis-substitutionseffekte-erneuerbarer>

Projekt SeEiS – Abschlussbericht (folgt 2020)

Kontakt:

Dr. Robert Kunze, ESA² GmbH
Bernhardstr. 92, 01187 Dresden

phone: +49 (0) 351 3746 176

e-mail: robert.kunze@esa2.eu

www.esa2.eu

Literatur

- [BAFA_2018] Bundesamt für Ausfuhrkontrolle (2018): Rohstoffe. http://www.bafa.de/DE/Energie/Rohstoffe/rohstoffe_node.html.
- [BMU_2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): Leitstudie 2007 “Ausbaustrategie Erneuerbare Energien”. Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050.
- [BMU_2008] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008): Leitstudie 2008 – Weiterentwicklung der “Ausbaustrategie Erneuerbare Energien” vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas.
- [BMU_2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
- [BMU_2012] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
- [BMWi_2016] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2015, Berlin.
- [BNetzA_2014a] Bundesnetzagentur (2014): Monitoringbericht 2014.
- [BNetzA_2014b] Bundesnetzagentur (2014): Kraftwerksliste. Stand: 19.02.2014.
- [BNetzA_2014c] Bundesnetzagentur (2014): Kraftwerksliste. Stand: 17.10.2014.
- [BNetzA_2015] Bundesnetzagentur (2015): Monitoringbericht 2015.
- [BNetzA_2016a] Bundesnetzagentur (2016): Monitoringbericht 2016.
- [BNetzA_2016b] Bundesnetzagentur (2016): Kraftwerksliste. Stand: 10.05.2016.
- [BNetzA_2017a] Bundesnetzagentur (2017): Monitoringbericht 2017. Stand: 13.12.2017.
- [BNetzA_2017b] Bundesnetzagentur (2017): Kraftwerksliste. Stand: 31.03.2017.
- [BNetzA_2018a] Bundesnetzagentur (2018): Monitoringbericht 2018. Stand: 8. Februar 2019.
- [BNetzA_2018b] Bundesnetzagentur (2018): Kraftwerksliste. Stand: 02.02.2018.
- [Diekmann_2007] Diekmann, J.; Krewitt, W.; Musiol, F.; Nicolosi, M.; Ragwitz, M.; Sensfuß, F.; Weber, C.; Wissen, R.; Woll, O. (2007): Fachgespräch zum Merit-Order Effekt: Abgestimmtes Thesenpapier.
- [DIW_2013] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2013): Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050. Data Documentation. Berlin.
- [EC_2017] European Commission (2017): Weekly Oil Bulletin. <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/weekly-oil-bulletin>.
- [ENTSO-E_2014] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2014): STATISTICAL FACTSHEET 2013.
- [ENTSO-E_2015] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2015): STATISTICAL FACTSHEET 2014.
- [ENTSO-E_2016] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2016): STATISTICAL FACTSHEET 2015.

Literatur

- [ENTSO-E_2017a] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2017): STATISTICAL FACTSHEET 2016.
- [ENTSO-E_2017b] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2017): Transparency Platform. <https://transparency.entsoe.eu>.
- [ENTSO-E_2018a] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2018): STATISTICAL FACTSHEET 2017.
- [ENTSO-E_2018b] European Network of Transmission System Operators for Electricity (2018): Transparency Platform. <https://transparency.entsoe.eu>.
- [Eurostat_2017] Eurostat (2017): Database. <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
- [Gaidosch_2007] Gaidosch, L. (2007): Zyklen bei Kraftwerksinvestitionen in liberalisierten Märkten - Ein Modell des deutschen Stromerzeugungsmarktes, Diss., TU Berlin.
- [Holster_1996] Holster, F. (1996): "Auswirkungen des europäischen Binnenmarktes für Energie auf die deutsche Elektrizitätswirtschaft", Schriften des energiewirtschaftlichen Instituts, Universität Köln, Band 49, R. Oldenbourg Verlag, München.
- [IER_2010] IER Uni Stuttgart (2010): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 - Energieprognose 2009. Stuttgart.
- [Klobasa_2016] Klobasa, M.; Sensfuß, F. (2016): CO2-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien in den Jahren 2012 und 2013. Europaweite Modellierung der Substitutionsbeziehungen unter Berücksichtigung des deutschen Stromaußenhandels, UBA (Hrsg.), Dessau-Rosslau.
- [Netztrans_2017] Netztransparenz.de (2017): <https://www.netztransparenz.de/>.
- [Netztrans_2018] Netztransparenz.de (2018): <https://www.netztransparenz.de/>.
- [Sensfuß_2010] Sensfuß, F. (2010): Analysen zum Merit-Order Effekt erneuerbarer Energien, Karlsruhe.
- [Schröter_2004] Schröter, J. (2004): Auswirkungen des europäischen Emissionshandelssystems auf den Kraftwerkseinsatz in Deutschland.
- [Schubert_2016] Schubert, D. K. J. (2016). Bewertung von Szenarien für Energiesysteme. TU Dresden.
- [Traber_2011] Traber, T.; Kemfert, C. (2011): Gone with the Wind? – Electricity Market Prices and Incentives to Invest in Thermal Power Plants under Increasing Wind Energy Supply. Energy Economics 33 (2011), pp.249–256.
- [UBA_2014] UBA (2014): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013.
- [UBA_2018] Memmler, M., Lauf, T., Wolf, K., Schneider, S. (2018). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2017 - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2017, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [VGB_2011] VGB PowerTech (2011): Investment and Operation Cost Figures – Generation Portfolio, Essen.
- [Ziems_2012] Ziems, Ch., Meinke, S., Nocke, J., Weber, H., Hassel, E. (2012): Kraftwerksbetrieb bei Einspeisung von Windparks und Photovoltaikanlagen. Rostock.