

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, 18. Juni 2024

# Projektdaten SeEiS

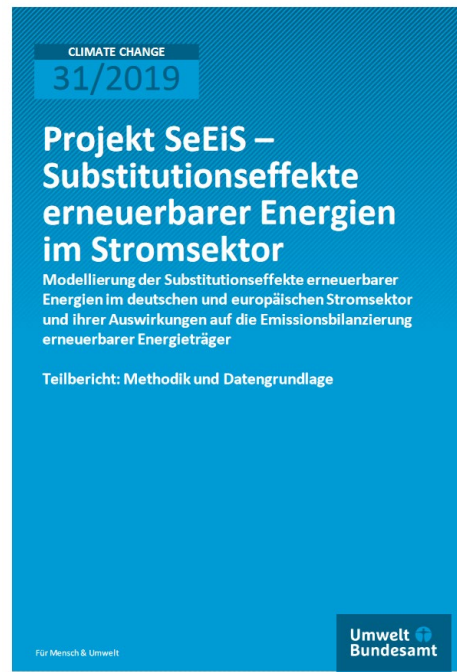
**Modellierung der Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im deutschen und europäischen Stromsektor und ihrer Auswirkungen auf die Emissionsbilanzierung Erneuerbarer Energieträger**

**Auftraggeber:** Umweltbundesamt  
FKZ 37EV 16 126 0

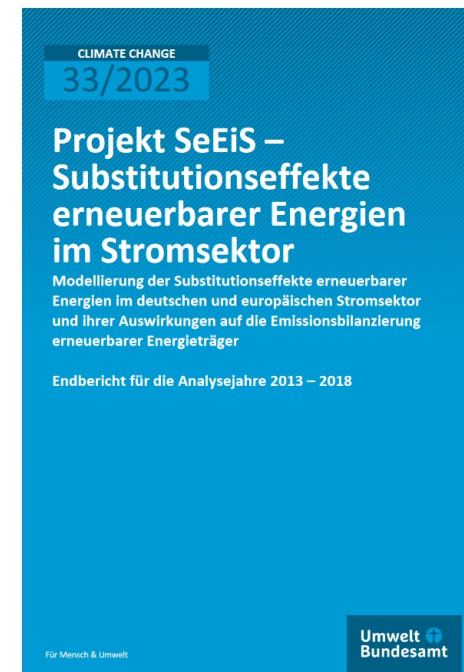
**Auftragnehmer:** ESA<sup>2</sup> GmbH  
TU Dresden  
Karlsruher Institut  
für Technologie (KIT)  
TEP Energy GmbH

**Laufzeit:** Mai 2017 bis April 2022

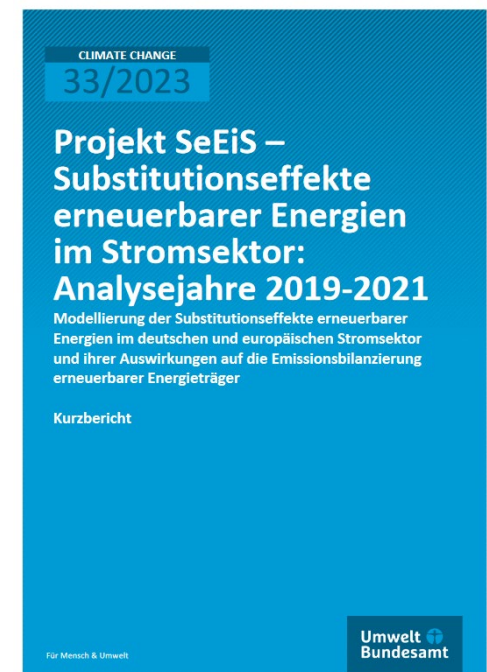
**Teilbericht**  
**Methodik & Daten**



**Endbericht**  
**Analysejahre 2013 - 2018**



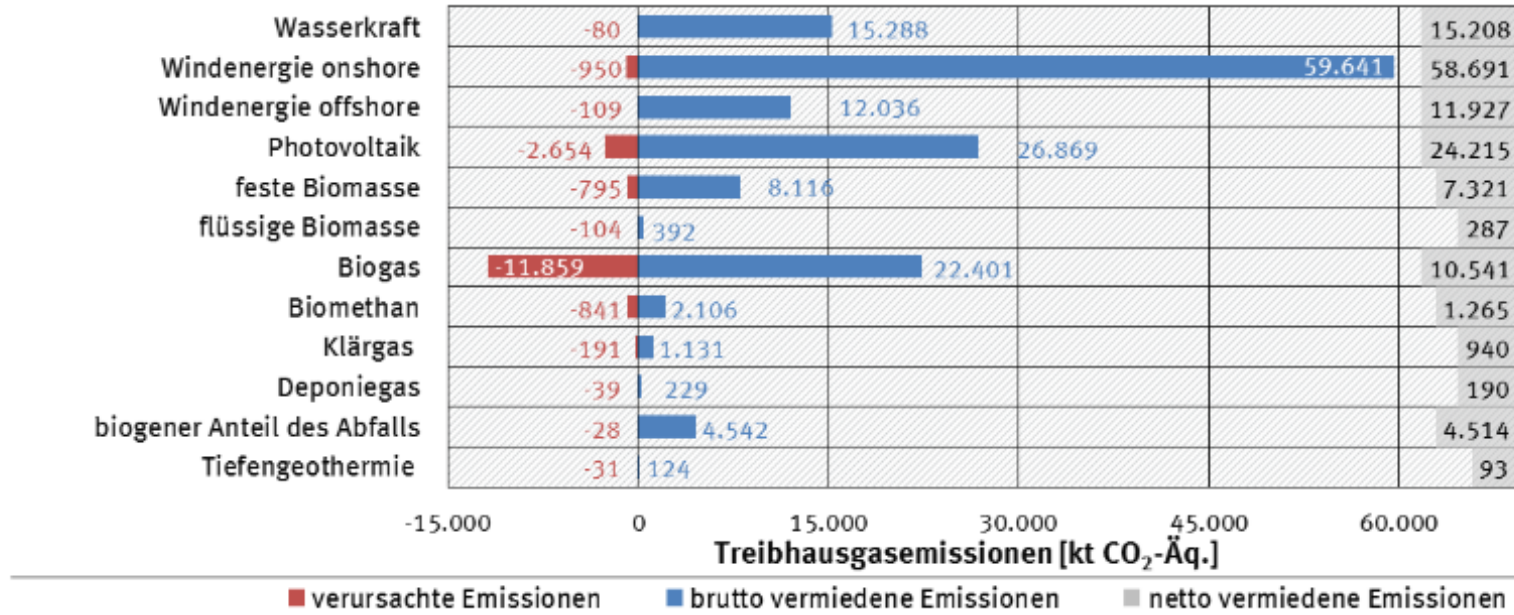
**Ergänzender Kurzbericht**  
**Analysejahre 2019 - 2021**



<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

# Hintergrund & Ziel des SeEiS-Projektes

## EE-Emissionsbilanz für den Stromsektor 2017:



Quelle: UBA (2018) Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2017

## Vorstudie 2016 (Fraunhofer ISI)



<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

- Bis basierend auf ex-post Strommarktdaten der Vorjahre mit beschränktem Blick auf Deutschland
- Zunehmender Einfluss der steigenden EE-Stromerzeugung auf die deutsche Strom-Außenhandelsbilanz
- **ZIEL:** Überarbeitung der Methodik zur Herleitung der Substitutionseffekte und deren Quantifizierung (erstmalig berücksichtigt in der Emissionsbilanz 2018)

# Agenda

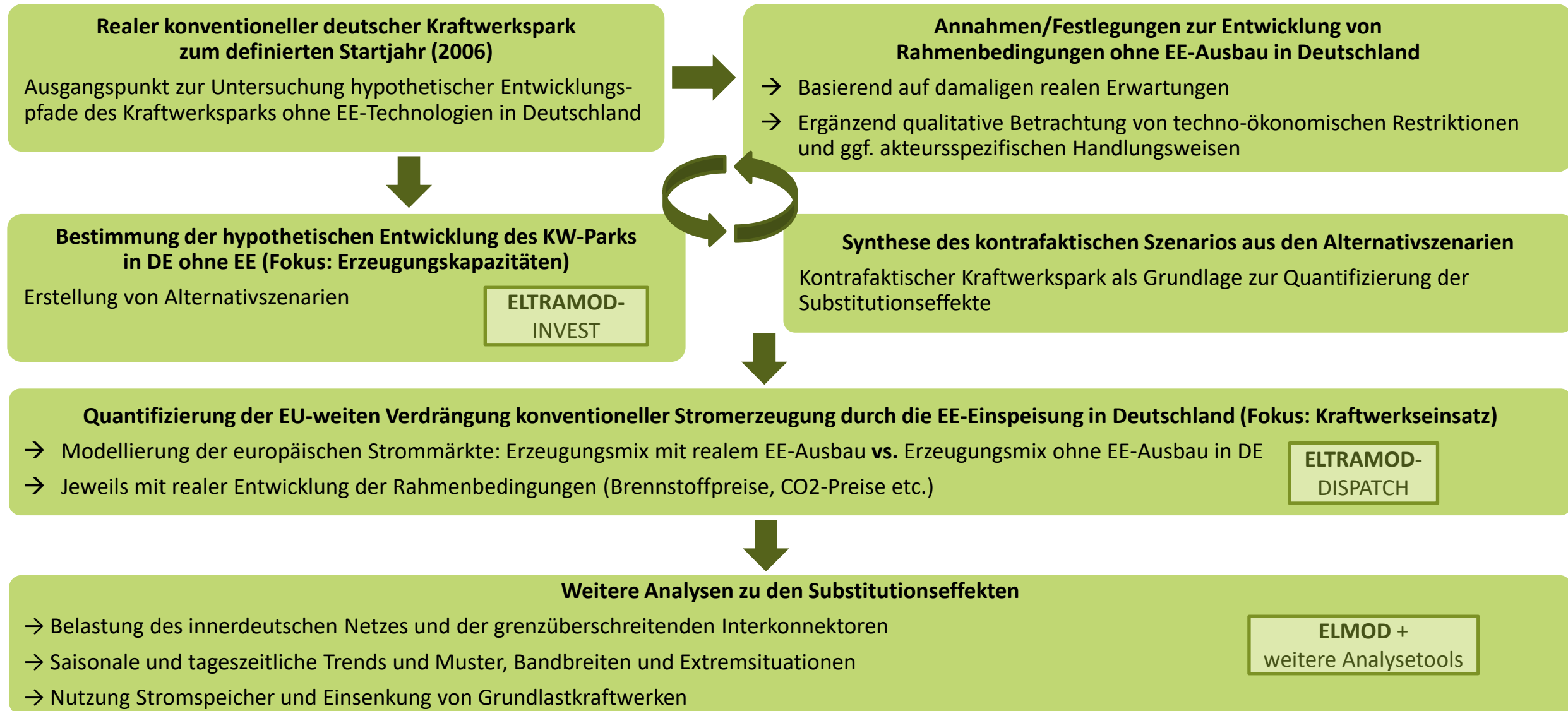
---

- Methodische Umsetzung des SeEiS-Projektes
- Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks in Deutschland ohne EE-Technologien
- Ergebnisse: Quantifizierung der EU-weiten Substitutionseffekte durch die deutsche EE-Stromerzeugung

# Methodische Umsetzung des SeEiS-Projektes

- Überblick zur Vorgehensweise
- Kurzvorstellung der Modellierungswerkzeuge

# Methodische Umsetzung SeEiS - Überblick



# Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

## Modellierungswerkzeuge: Umfang und Darstellung ELTRAMOD

### Input

#### Erzeugung

- Erzeugungskapazitäten
- Brennstoffpreise
- CO<sub>2</sub>-Preise
- Erzeugungsparameter
- Stündliche EE-Einspeise-Profile

#### Nachfrage

- Jährlicher Strombedarf
- Stündlicher Lastverlauf

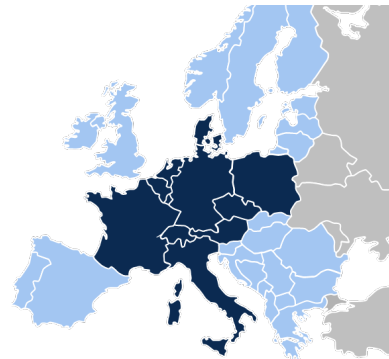
#### Infrastruktur

- Kupferplatte innerhalb einer Marktzone
- Transnationaler Handel durch NTC begrenzt (stündliche Werte)

### Methodik ELTRAMOD

- Ziel: Kostenminimierung Kraftwerkseinsatz und -ausbau
- Zeitliche Auflösung: 8760 h pro Jahr

Detaillierungsgrad  
des Kraftwerksportfolios



■ Blockscharfer Kraftwerkspark

■ Aggregierter Kraftwerkspark

■ Nicht berücksichtigt

### Output

#### System Aspekte

- Kraftwerksausbau
- Erzeugung (Dispatch)
- Kraftwerksauslastung
- Speicherauslastung
- Emissionen
- (EE-/ Last-Abschaltung)

#### Ökonomische Aspekte

- Systemkosten
- Länderübergreifende Handelsflüsse



**Quantifizierung der  
Substitutionseffekte**



# Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

## Modellierungswerkzeuge: ELTRAMOD-INVEST und ELTRAMOD-DISPATCH

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



# Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks

- Grundsätzliche Festlegungen und verwendete Daten
- Synthese des kontrafaktischen Kraftwerksparks

# Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks in Deutschland

## Grundsätzliche Festlegungen

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

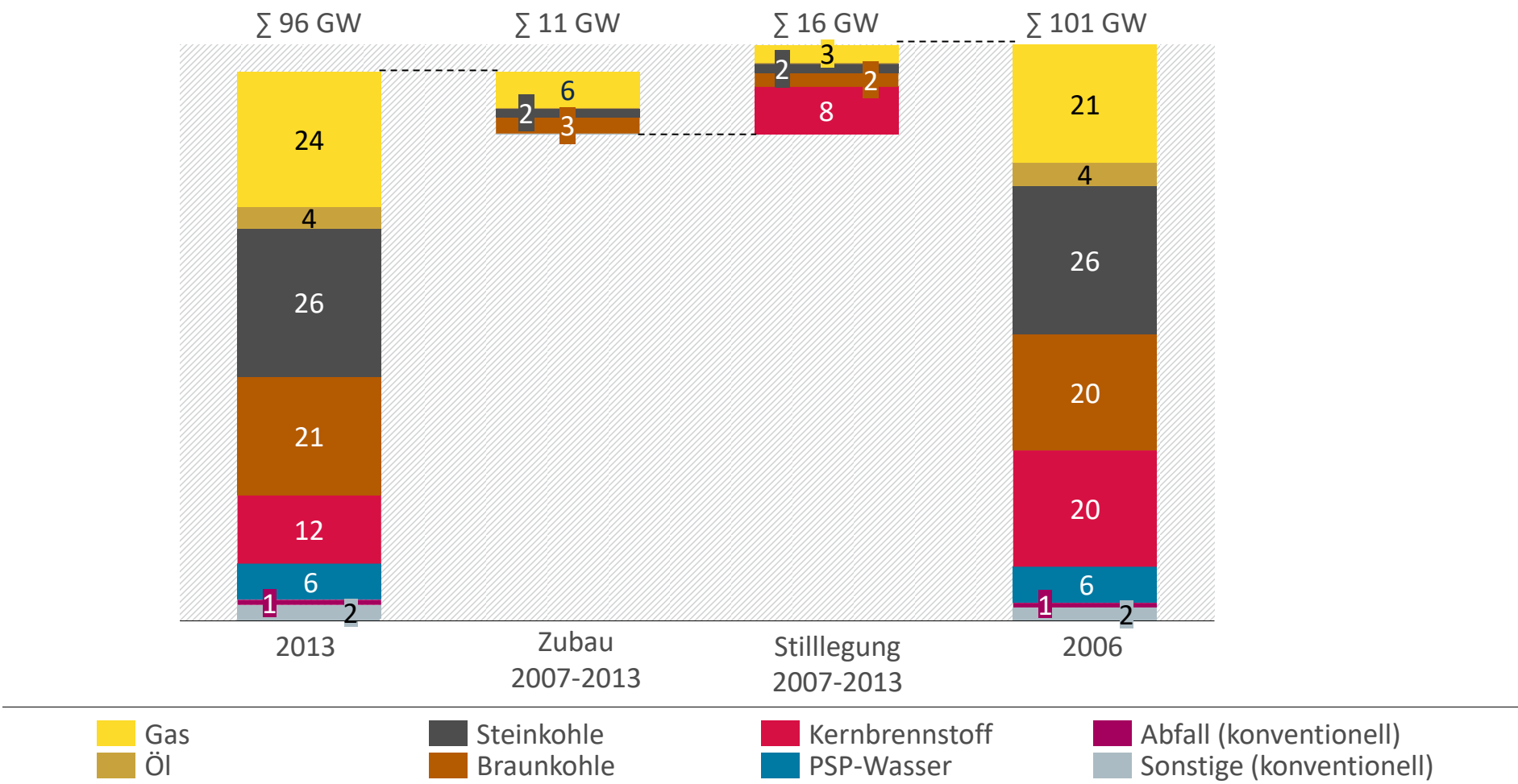
Die Betrachtung der hypothetischen Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks beschränkt sich auf Steinkohle-, Gas- und Öl-Erzeugungskapazitäten.

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

# Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks in Deutschland

## Ermittlung des deutschen Kraftwerksparks 2006

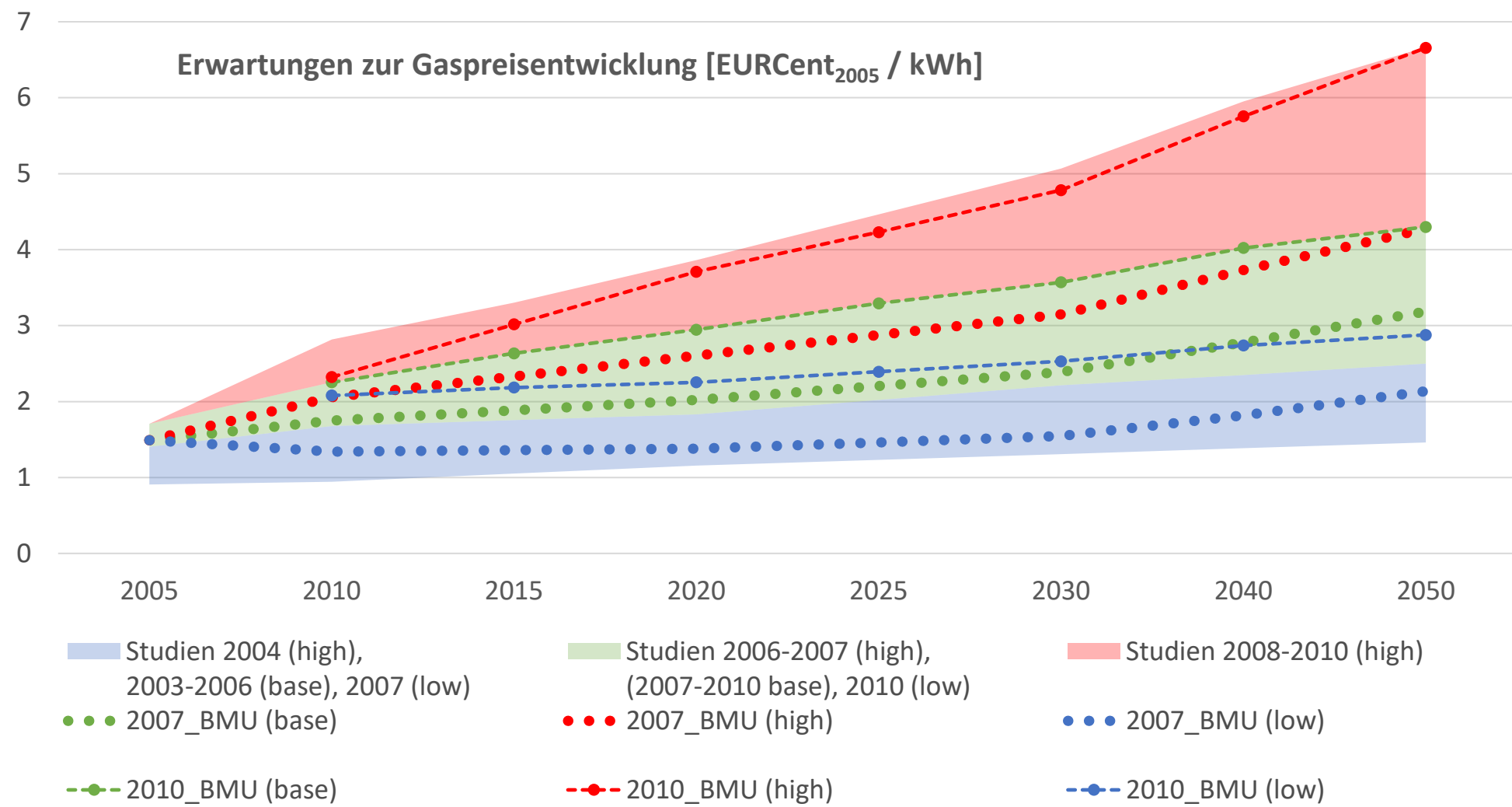
Reproduktion der installierten konventionellen Erzeugungskapazitäten für 2006 ausgehend vom Kraftwerkspark 2013 und den bekannten Inbetriebnahmen und Stilllegungen 2007 bis 2013



Quelle: Basierend auf Daten der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur [BNetzA\_2014b, BNetzA\_2014c, BNetzA\_2016b, BNetzA\_2017b]

# Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks in Deutschland

Damals erwartete Entwicklung von Rahmenbedingungen (aus Studien 2002 - 2010)

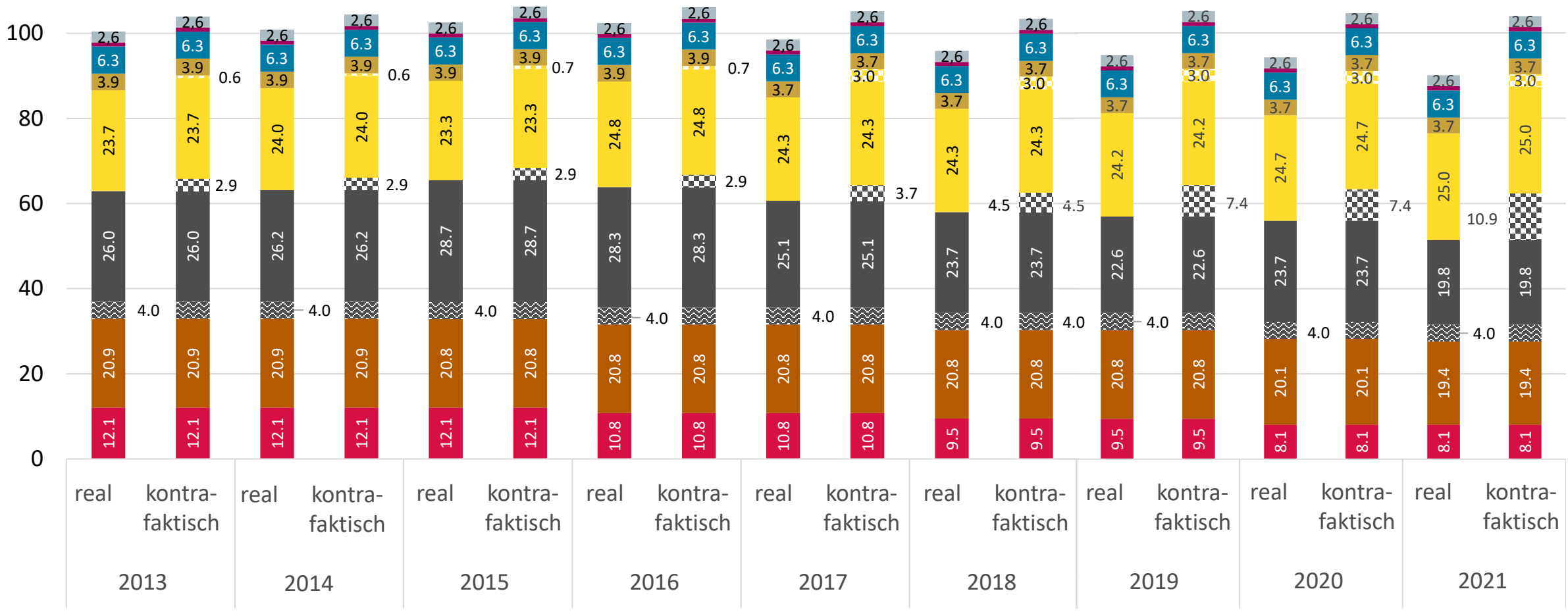


Quelle: Basierend auf [EK\_2002, EC-PRIMES\_2003, EC-PRIMES\_2004, EC-PRIMES\_2005, EWI\_2005, UBA\_2005, EC-PRIMES\_2006, IEA\_2006, EC-PRIMES\_2007, BMU\_2007, IER\_2007, EWI\_2007, BMU\_2008, EC-Primes\_2008, ICCS\_2008, UBA\_2009a, UBA\_2009b, BMU\_2010, EURELECTRIC\_2010, ICCS\_2010, IEA\_2010, IER\_2010, ISI\_2010]

# Entwicklung des kontrafaktischen Kraftwerksparks in Deutschland

## Ergebnis der Synthese des kontrafaktischen Kraftwerksparks

Installierte konventionelle Stromerzeugungskapazitäten in Deutschland 2013-2017 real und kontrafaktisch



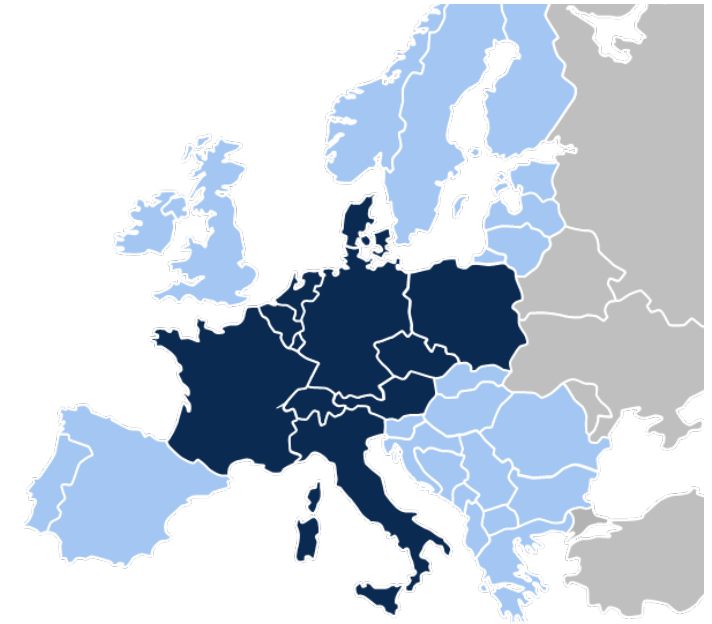
# Quantifizierung der Substitutionseffekte

- Überblick zur Methodik
- Ergebnisse

# Quantifizierung der Substitutionseffekte – Überblick Methodik

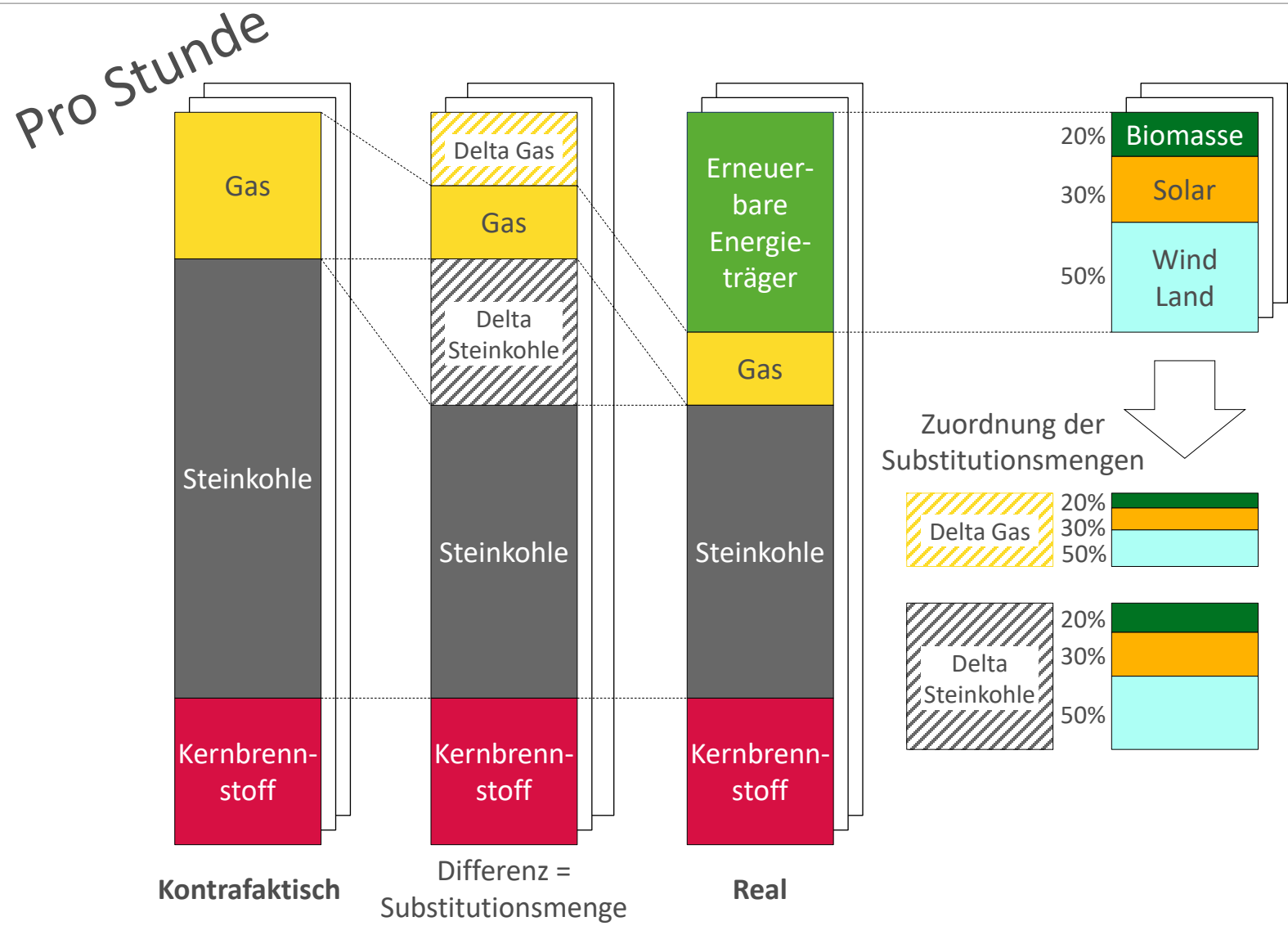
- Analyse des Kraftwerkseinsatzes mit dem Strommarktmodell  
ELTRAMOD-Dispatch
- 2 Modellläufe: 1 x mit EE (realer Fall) und 1 x ohne EE (kontrafaktischer Fall)
  - Realdaten für Brennstoffpreise, Nachfrage und CO<sub>2</sub>-Zertifikate
  - Kalibrierung des realen Falls anhand tatsächlicher Erzeugungs- und Handelsdaten
- Substitutionseffekte werden durch die Betrachtung Einsatzdifferenzen bestimmt pro:
  - EE-Technologie
  - Konventionellem Energieträger
  - Land

Einsatz EU-Kraftwerkspark



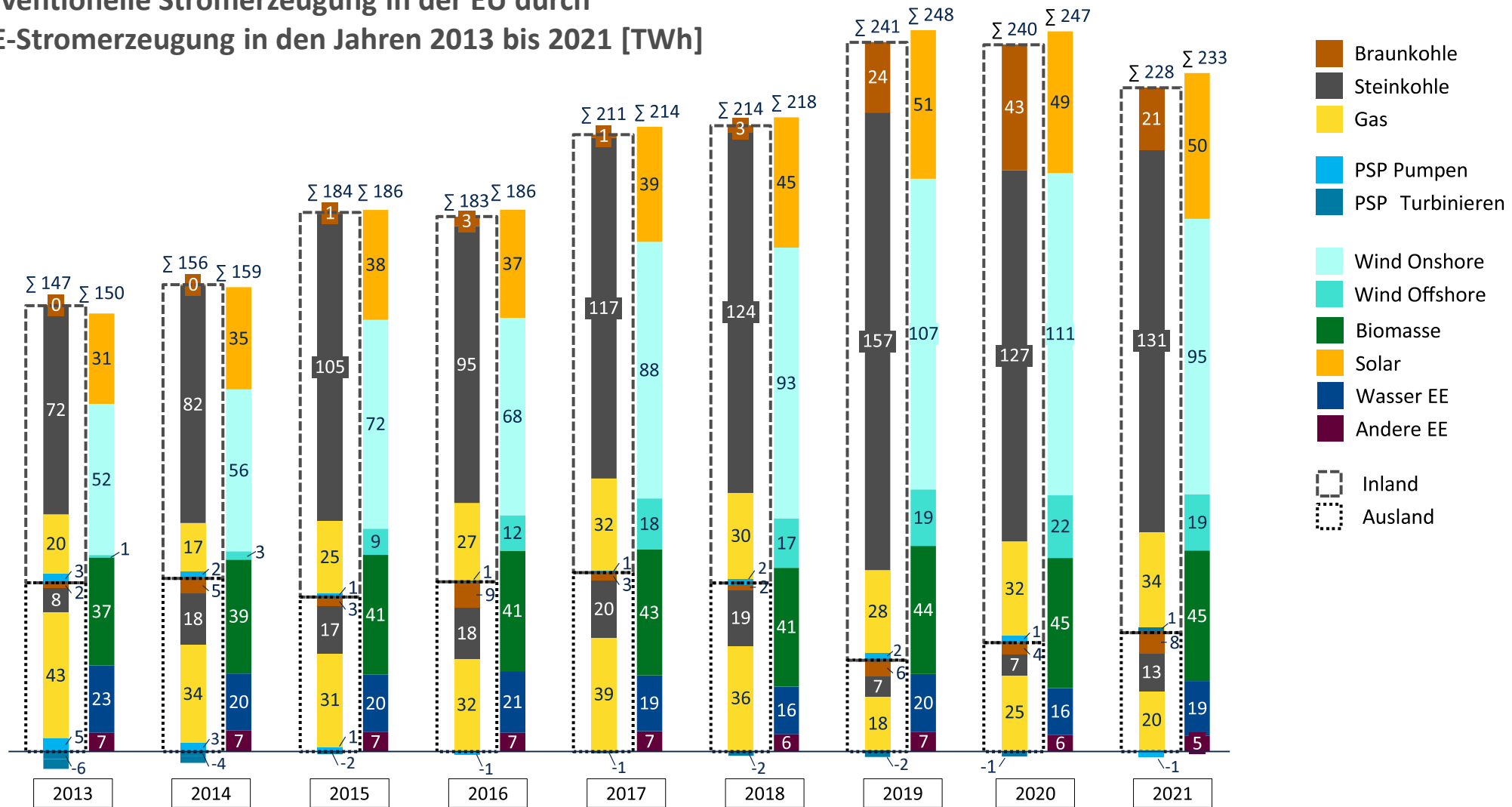


# Quantifizierung der Substitutionseffekte – Überblick Methodik



# Quantifizierung der Substitutionseffekte – Ergebnisse

Verdrängte konventionelle Stromerzeugung in der EU durch die deutsche EE-Stromerzeugung in den Jahren 2013 bis 2021 [TWh]



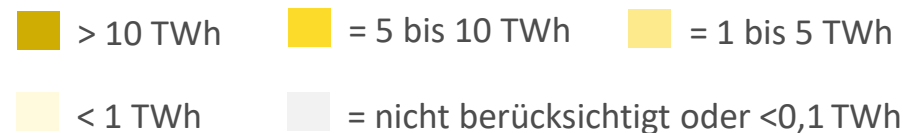
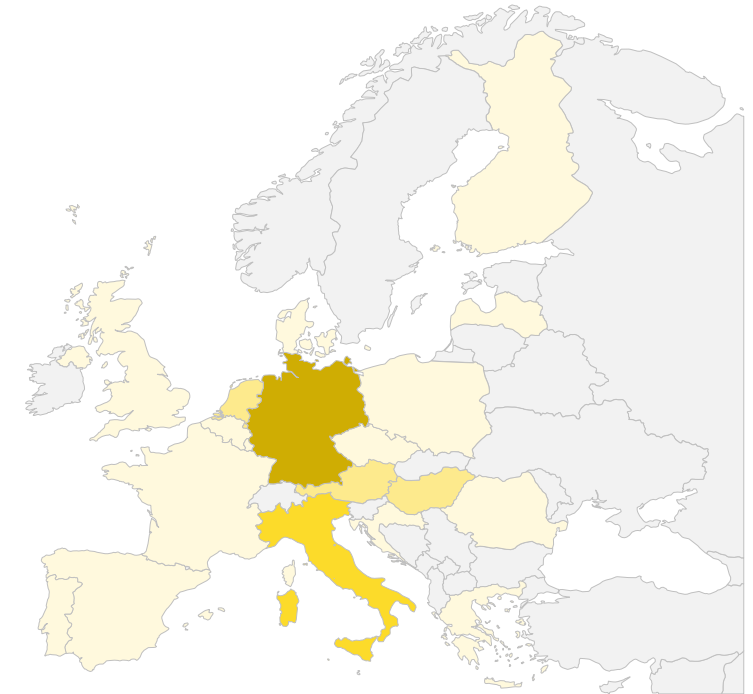
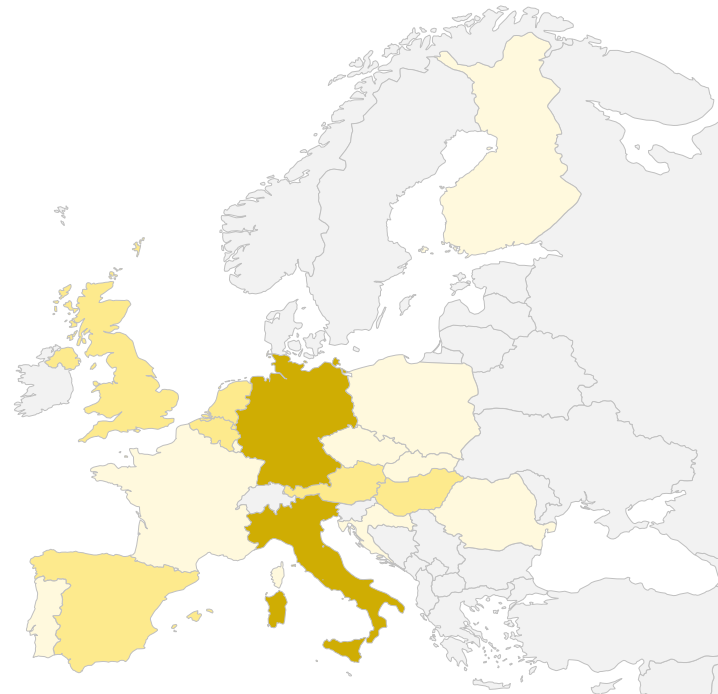
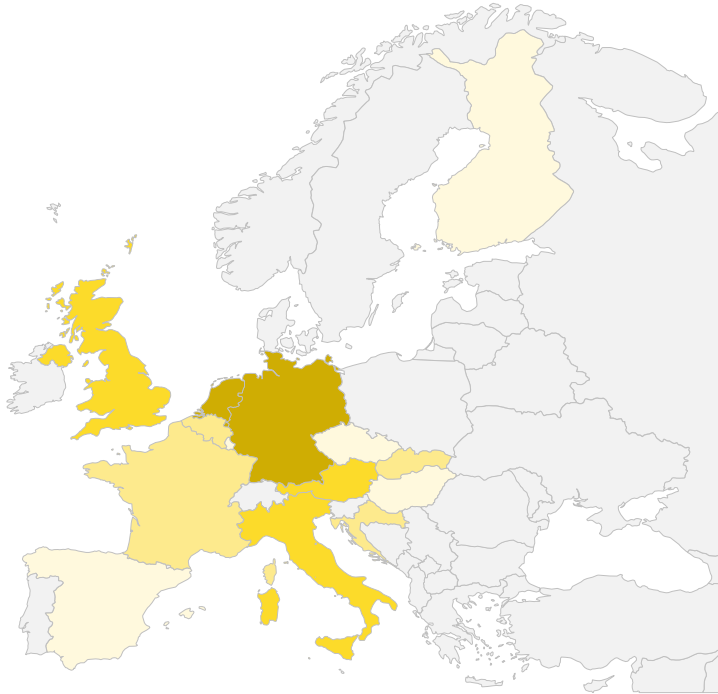
# Quantifizierung der Substitutionseffekte – Ergebnisse

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

2013

2017

2021



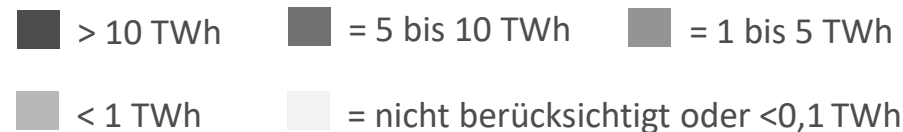
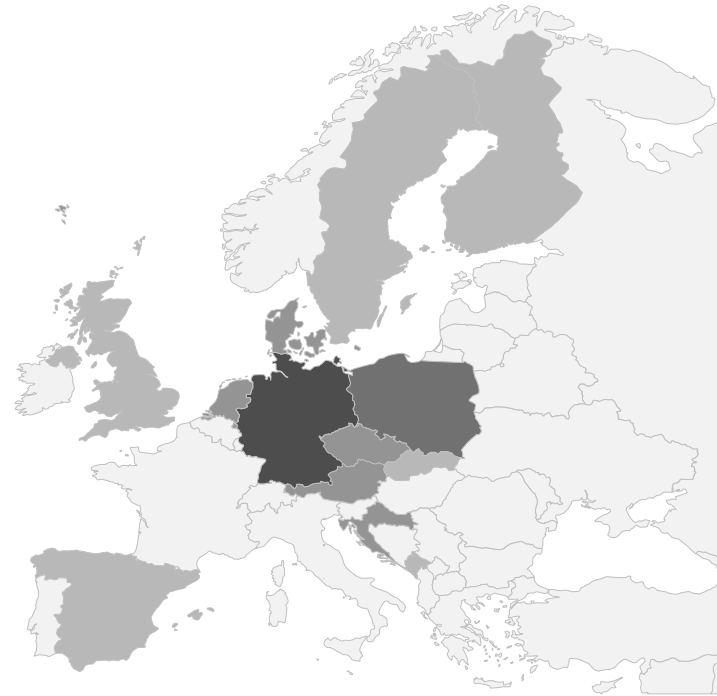
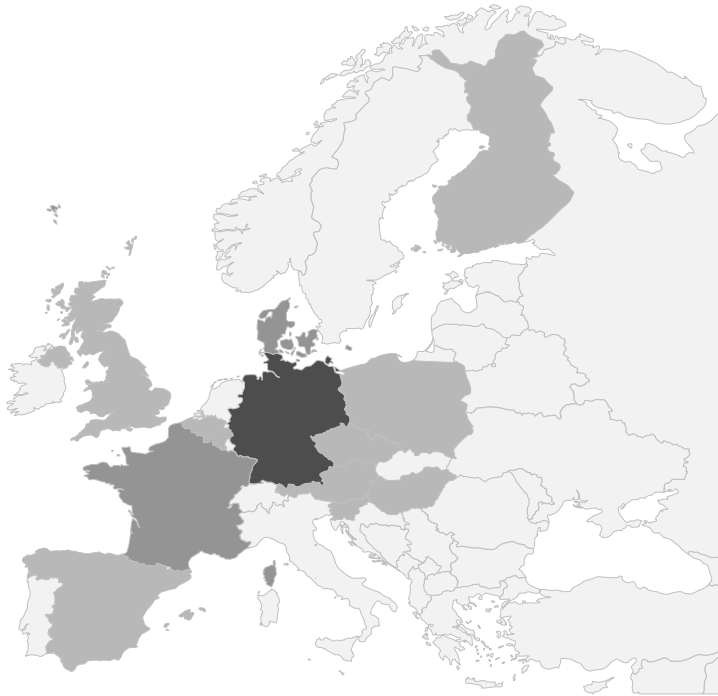
# Quantifizierung der Substitutionseffekte – Ergebnisse

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

2013

2017

2021



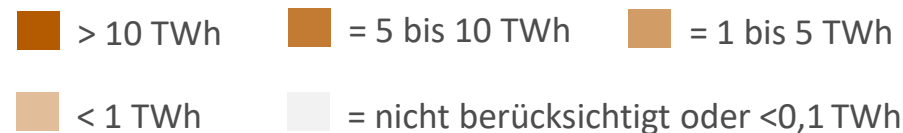
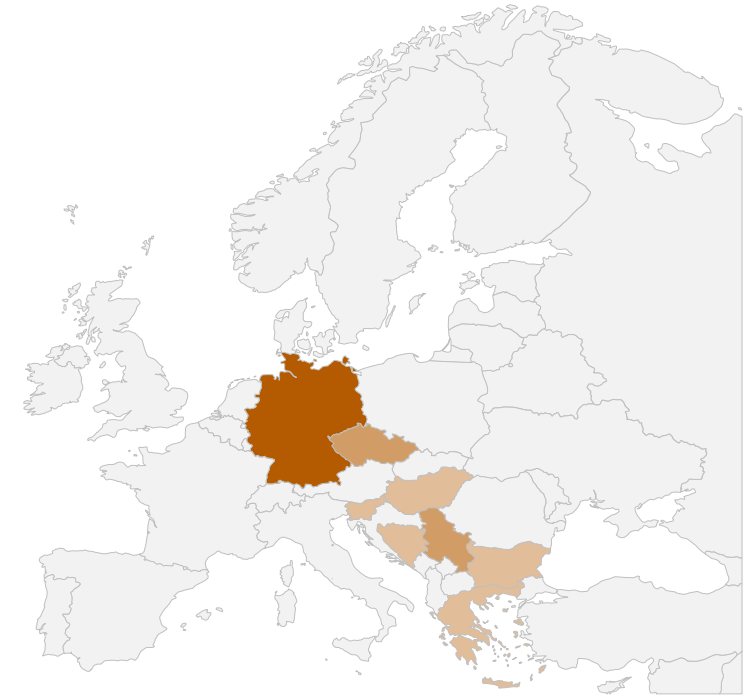
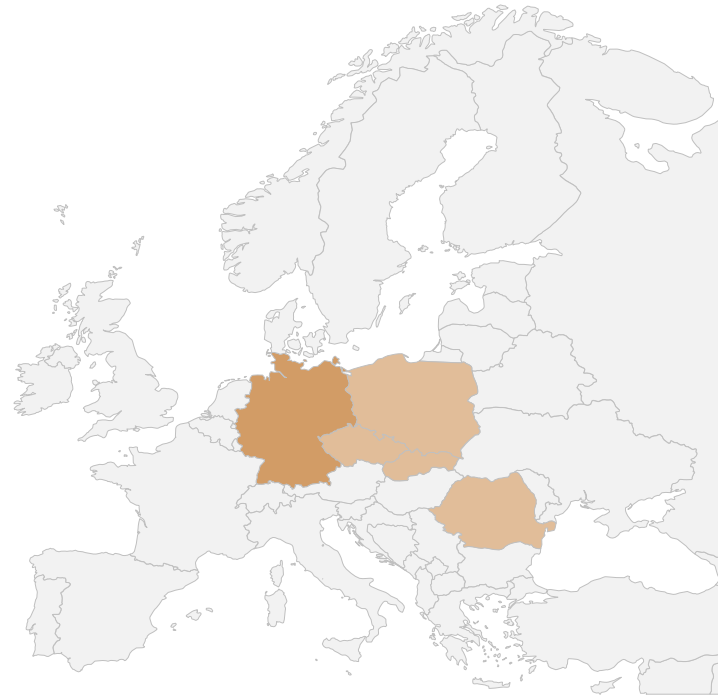
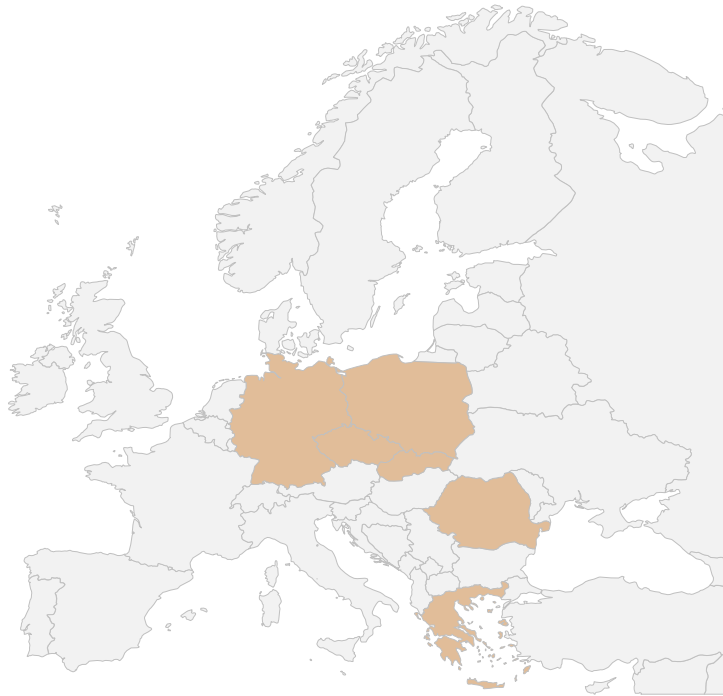
# Quantifizierung der Substitutionseffekte – Ergebnisse

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

2013

2017

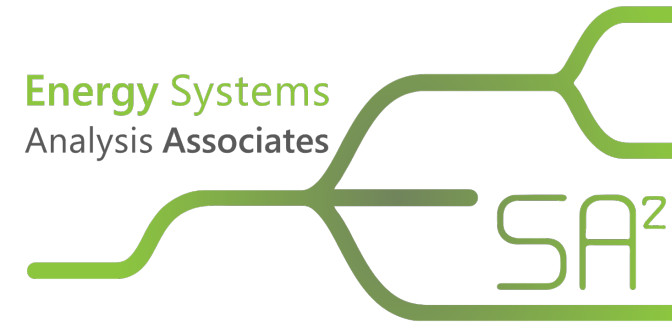
2021



# Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr. Robert Kunze  
ESA<sup>2</sup> GmbH  
Bernhardstr. 92  
01187 Dresden

phone: +49 (0) 351 3746 176  
e-mail: [robert.kunze@esa2.eu](mailto:robert.kunze@esa2.eu)  
[www.esa2.eu](http://www.esa2.eu)



- [BMU\_2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (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] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Fraunhofer IWES, Ingenieurbüro für neue Energien (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Leitstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [BNetzA\_2014b] Bundesnetzagentur (2014): Kraftwerksliste. Stand: 19.02.2014.
- [BNetzA\_2014c] Bundesnetzagentur (2014): Kraftwerksliste. Stand: 17.10.2014.
- [BNetzA\_2016b] Bundesnetzagentur (2016): Kraftwerksliste. Stand: 10.05.2016.
- [BNetzA\_2017b] Bundesnetzagentur (2017): Kraftwerksliste. Stand: 31.03.2017.
- [BNetzA\_2018b] Bundesnetzagentur (2018): Kraftwerksliste. Stand: 02.02.2018.
- [EC-PRIMES\_2003] Mantzos, L., Capros, P., Kouvaritakis, N., Zeka–Paschou, M., Chesshire, J., Guilmot, J. F. (2003): European Energy and Transport. Trends to 2030. National Technical University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [EC-PRIMES\_2004] Mantzos, L., Capros, P., Zeka–Paschou, M., Chesshire, J., Guilmot, J. F. (2004): European Energy and transport. Scenarios on key drivers. National Technical University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [EC-PRIMES\_2005] Mantzos, L., Capros, P. (2005): European Energy and Transport. Trends to 2030 – update 2005. Institute of Communication and Computer Systems of National University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [EC-PRIMES\_2006] Mantzos, L., Capros, P. (2006): European Energy and transport. Scenarios on energy efficiency and renewables. Institute of Communication and Computer Systems of National University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [EC-PRIMES\_2007] Mantzos, L., Capros, P., Papandreou, V., Tasios, N. (2007): European Energy and Transport. Trends to 2030 – update 2007. Institute of Communication and Computer Systems of National University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [EC-PRIMES\_2008] Mantzos, L., Capros, P., Papandreou, V., Tasios, N. (2008): Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables. Institute of Communication and Computer Systems of National University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [EK\_2002] Enquete-Kommission (2002): Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung. Deutscher Bundestag, Drucksache 14/9400, Berlin.
- [EURELECTRIC\_2010] Union of the Electricity Industry (2010): Power Choices Pathways to Carbon-Neutral Electricity in Europe by 2050, Bussels.



- [EWI\_2005] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln und Prognos (2005): Energiereport IV – Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Basel, Köln, Berlin.
- [EWI\_2007] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln und Prognos (2007): Energieszenarien für den Energiegipfel 2007. Endbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Basel, Köln, Berlin.
- [ICCS\_2008] Capros, P., Mantzos, L., Papandreou, V., Tasios, N. (2008): European energy and transport. Trends to 2030 — Update 2007. Institute of Communication and Computer Systems of the National Technical University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [ICCS\_2010] Capros, P., Mantzos, L., Tasios, N., De Vita, A., Kouvaritakis, N. (2010): EU energy trends to 2030 — Update 2009. Institute of Communication and Computer Systems of the National Technical University of Athens on behalf of the European Commission, Luxembourg.
- [IEA\_2006] International Energy Agency (2006): World Energy Outlook 2006, Paris.
- [IEA\_2010] International Energy Agency, Nuclear Energy Agency and Organisation for Economic Co-operation and Development (2010): Projected Costs of Generating Electricity, Paris.
- [IER\_2007] Fahl, U., Rühle, B., Blesl, M., Ellersdorfer, I., Eltrop, L., Harlinghausen, D.-C., Küster, R., Rehrl, T., Remme, U. Voß, A. (2007): Energieprognose Bayern 2030. Gutachten des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Stuttgart.
- [IER\_2010] Fahl, U., Blesl, M., Voß, A. et al. (2010): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 - Energieprognose 2009. Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung und Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin.
- [ISI\_2010] Fraunhofer ISI (2010): iTREN-2030 - Integrated transport and energy baseline until 2030, Karlsruhe.
- [UBA\_2005] Umweltbundesamt (2005): Energiereferenzszenario 2000-2020 für Emissionsberechnungen des Umweltbundesamtes, Dessau.
- [UBA\_2009a] Borchert, J., Jungbluth, C., Peek, M., Ritzau, M. (2009): Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung. Kritische Würdigung der dena-Kurzanalyse zur Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020. Stand: Dezember 2008. Büro für Energiewirtschaft und technische Planungen GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Dessau-Roßlau.
- [UBA\_2009b] Matthes, F. Chr., Gores, S., Harthan, R. O., Mohr, L. Penninger, G., Markewitz, P., Hansen, P., Martinsen, D., Diekmann, J., Horn, M., Eichhammer, W., Fleiter, T., Köhler, J., Schade, W., Schlomann, B. Sensfuß, F., Ziesing, J. (2009): Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Fraunhofer ISI im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Dessau-Roßlau.
- [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.