



Im Auftrag des Umweltbundesamtes

AGEE Stat-Workshop

Aktuelle Entwicklungen in der Energiestatistik und Emissionsbilanzierung der erneuerbaren Energien

**PROJEKT SeEiS: MODELLIERUNG DER SUBSTITUTIONSEFFEKTE ERNEUERBARER ENERGIEN
IM DEUTSCHEN UND EUROPÄISCHEN STROMSEKTOR UND IHRER AUSWIRKUNGEN AUF DIE
EMISSIONSBILANZIERUNG ERNEUERBARER ENERGIETRÄGER**

Dr. Robert Kunze

ESA² GmbH

Dessau-Roßlau, 08. November 2017

Projektdaten

Projekt 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: **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

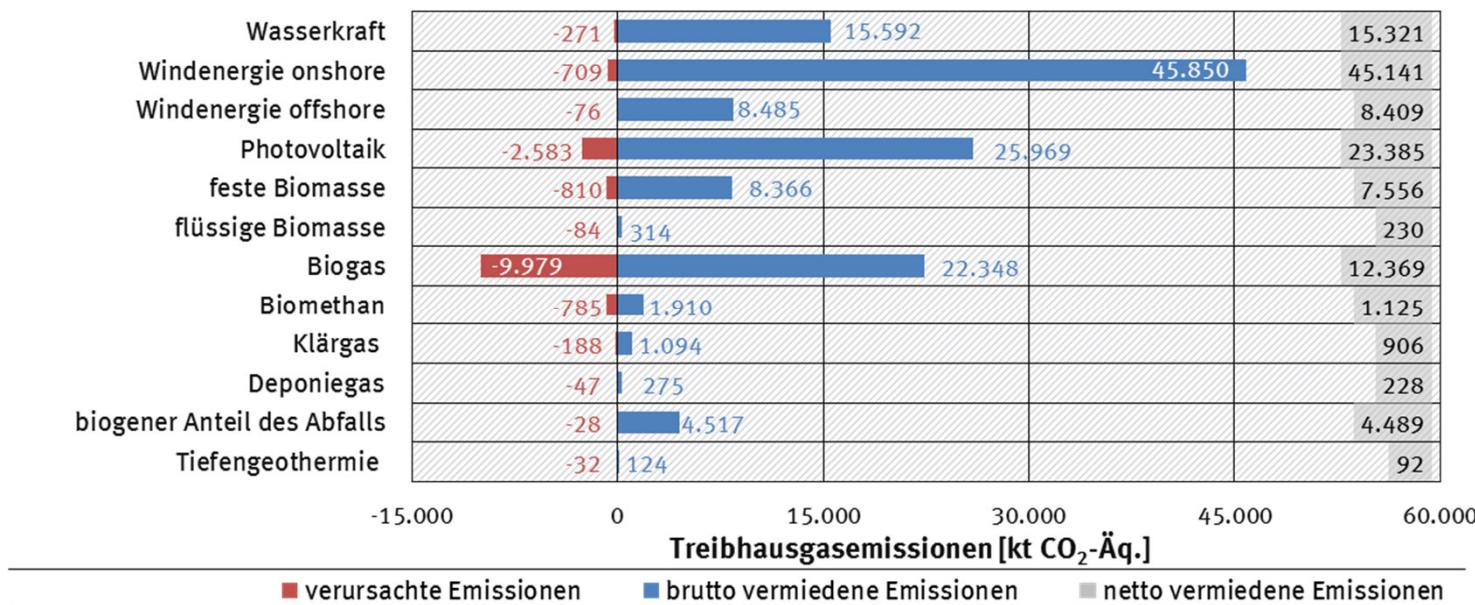
Agenda

- Hintergrund und Ziele des SeEiS-Projektes
- Überblick zum methodischen Umsetzungskonzept
- Erstellung von Alternativszenarien ohne EE-Stromerzeugung
- Bestimmung der Substitutionseffekte

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 konventioneller Stromerzeugung durch EE-Stromerzeugung
- Ausgleich der fluktuierenden EE-Erzeugung in DE durch Stromexporte und -importe
- Jahresnutzungsgrade verdrängter Kraftwerke/Einsenkung von Grundlastkraftwerken
- Einflüsse innerdeutscher Netzengpässe und der Interkonnektoren
- Wirkung von Stromspeichern im In- und Ausland (Quantifizierung der Nutzung)
- Identifikation/Charakterisierung saisonaler/tageszeitlicher Muster und Extremsituationen

Methodisch:

- Erstellung plausibler Alternativszenarien ohne deutsche EE-Stromerzeugung
- Transparente Analyse und robuste Quantifizierung der Substitutionseffekte
- Fortschreibung der Zeitreihen ist zu gewährleisten

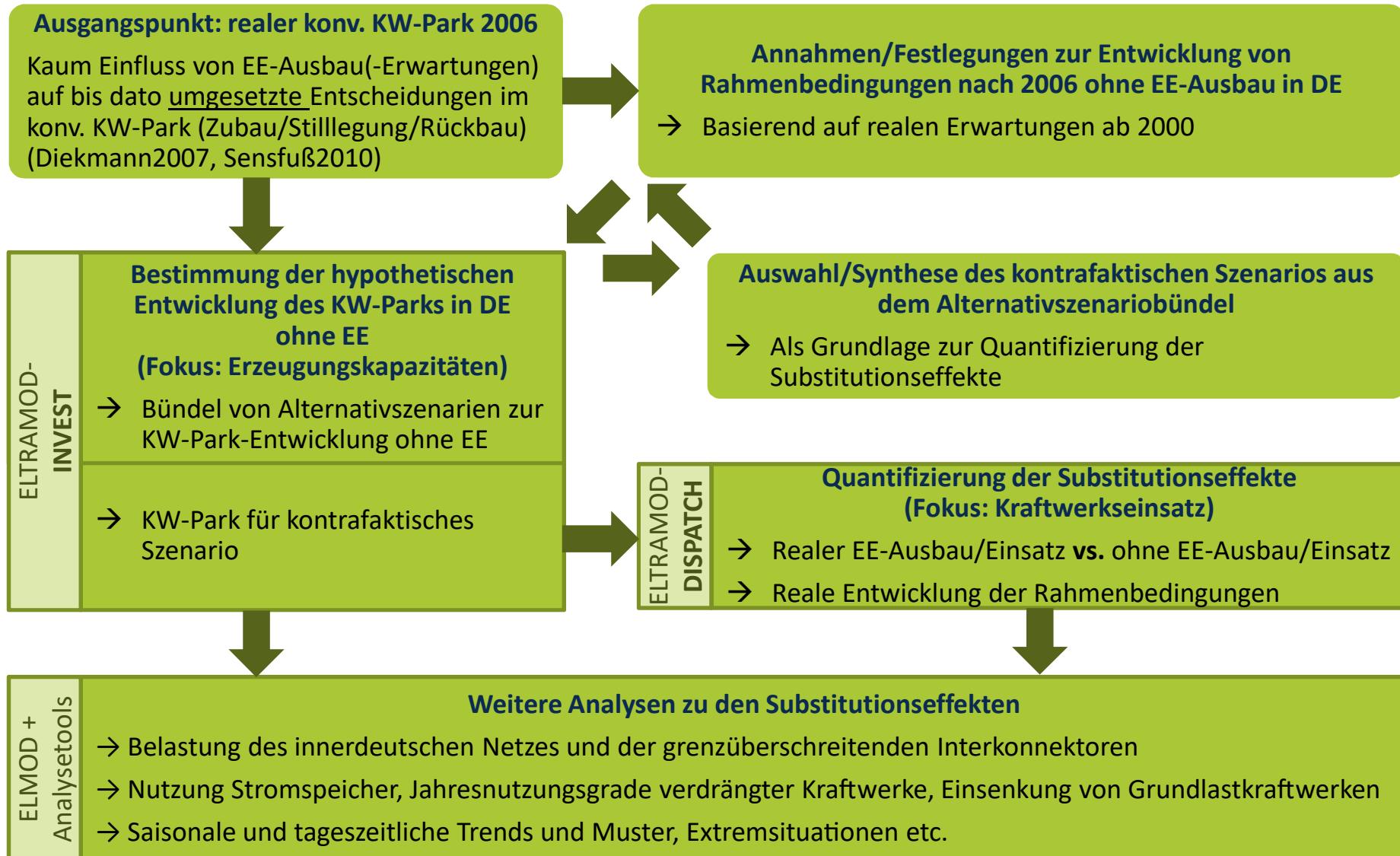
Methodisches Umsetzungskonzept

- Überblick zur Vorgehensweise
- Modellierungswerkzeuge

Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

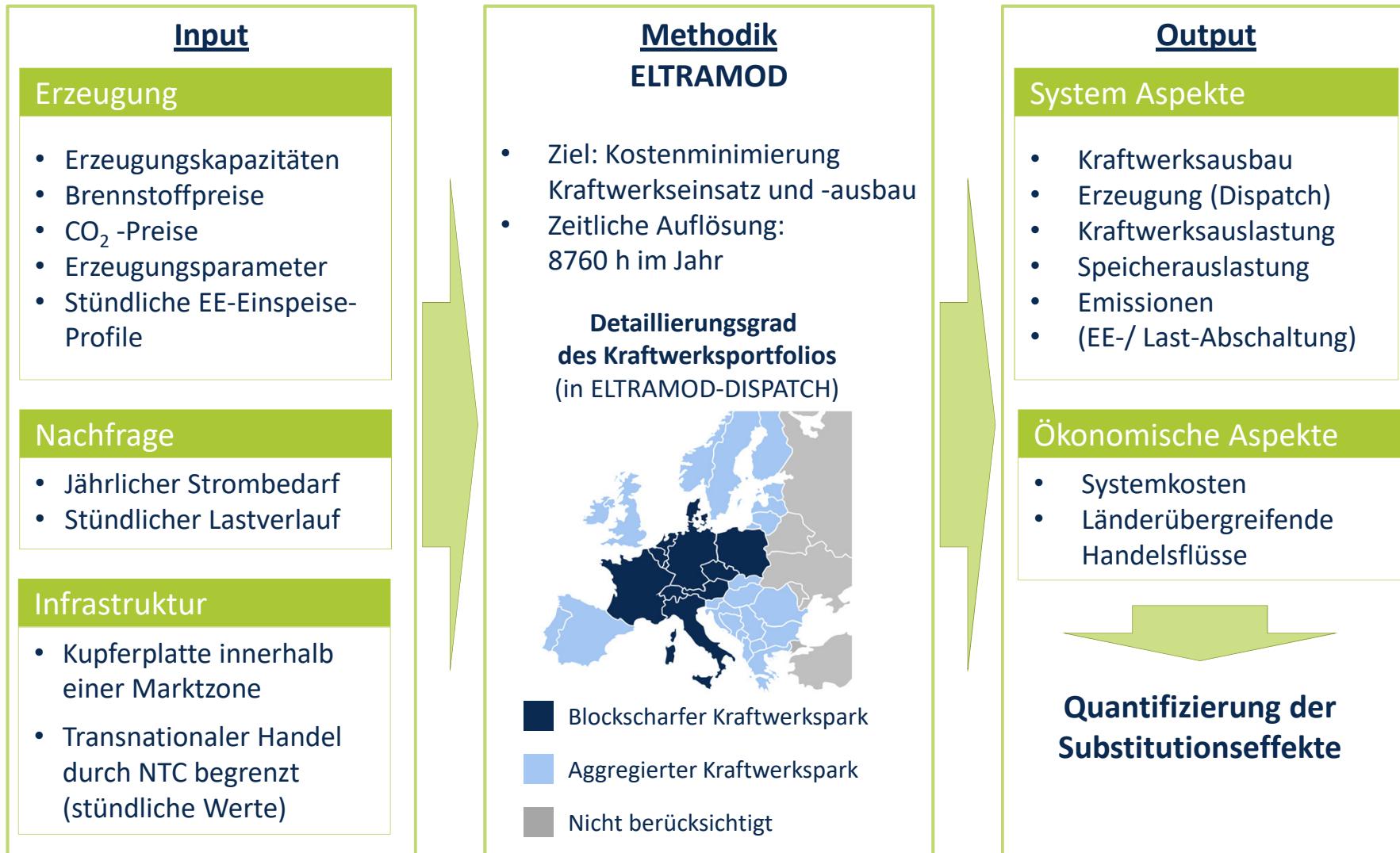
Überblick zur Vorgehensweise

KW = Kraftwerk



Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

Modellierungswerzeuge: Umfang und Darstellung ELTRAMOD



Methodisches Umsetzungskonzept SeEiS

Modellierungswerzeuge: Unterschied/Funktionsweise **ELTRAMOD-INVEST** und **ELTRAMOD-DISPATCH**

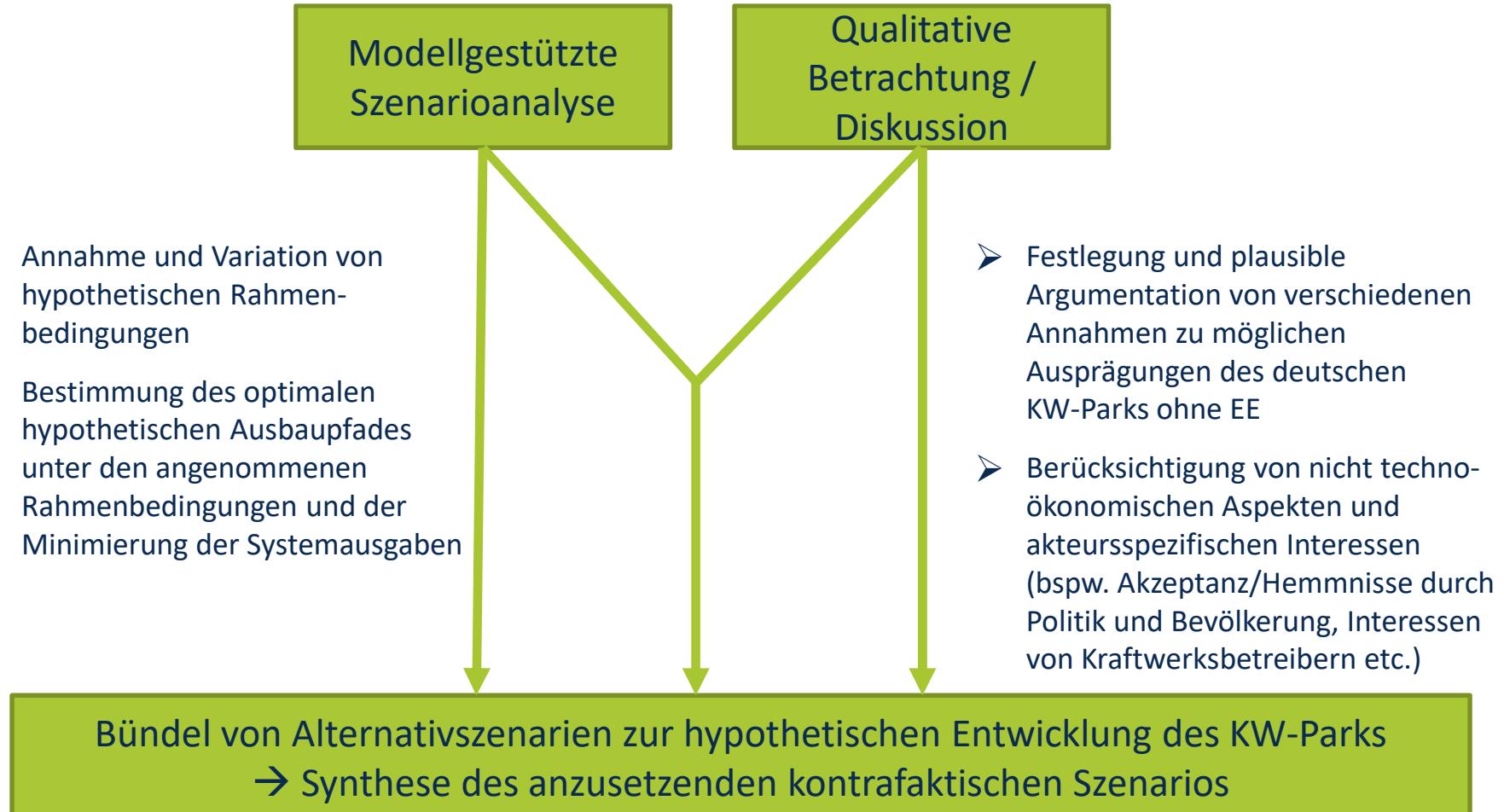
	ELTRAMOD-INVEST	ELTRAMOD-DISPATCH
Fokus	<ul style="list-style-type: none">• <u>Kraftwerksausbau</u> in Deutschland für das kontrafaktische Szenario	<ul style="list-style-type: none">• <u>Kraftwerkseinsatz</u> (stündliche Auflösung) zur Bestimmung der Substitutionsfaktoren
Spezifische Charakteristika	<ul style="list-style-type: none">• Aggreierter Kraftwerkspark im In- und Ausland• Myopische Modellierung des Kraftwerkszubaus in Deutschland• Berechnung des Zu- und Rückbau (unter Berücksichtigung von realisierten und geplanten Projekten)	<ul style="list-style-type: none">• Blockscharfe Abbildung des Kraftwerksparks in Deutschland und den Nachbarländern• Ermittlung des stündlichen Kraftwerks- und Speichereinsatzes im In- und Ausland• Identifizierung von tageszeitlichen und saisonalen Trends und Mustern

Erstellung von Alternativszenarien

- Herangehensweise und Annahmen zur Annäherung an eine hypothetische Welt ohne deutsche EE-Stromerzeugung
- Datenbasis und Methodik zur modellgestützten Bestimmung des hypothetischen Kraftwerksparks

Erstellung von Alternativszenarien

Herangehensweise zur Annäherung an eine hypothetische Welt ohne deutsche EE-Stromerzeugung



Erstellung von Alternativszenarien

Annahmen / Variationen für eine Welt ohne deutsche EE-Stromerzeugung

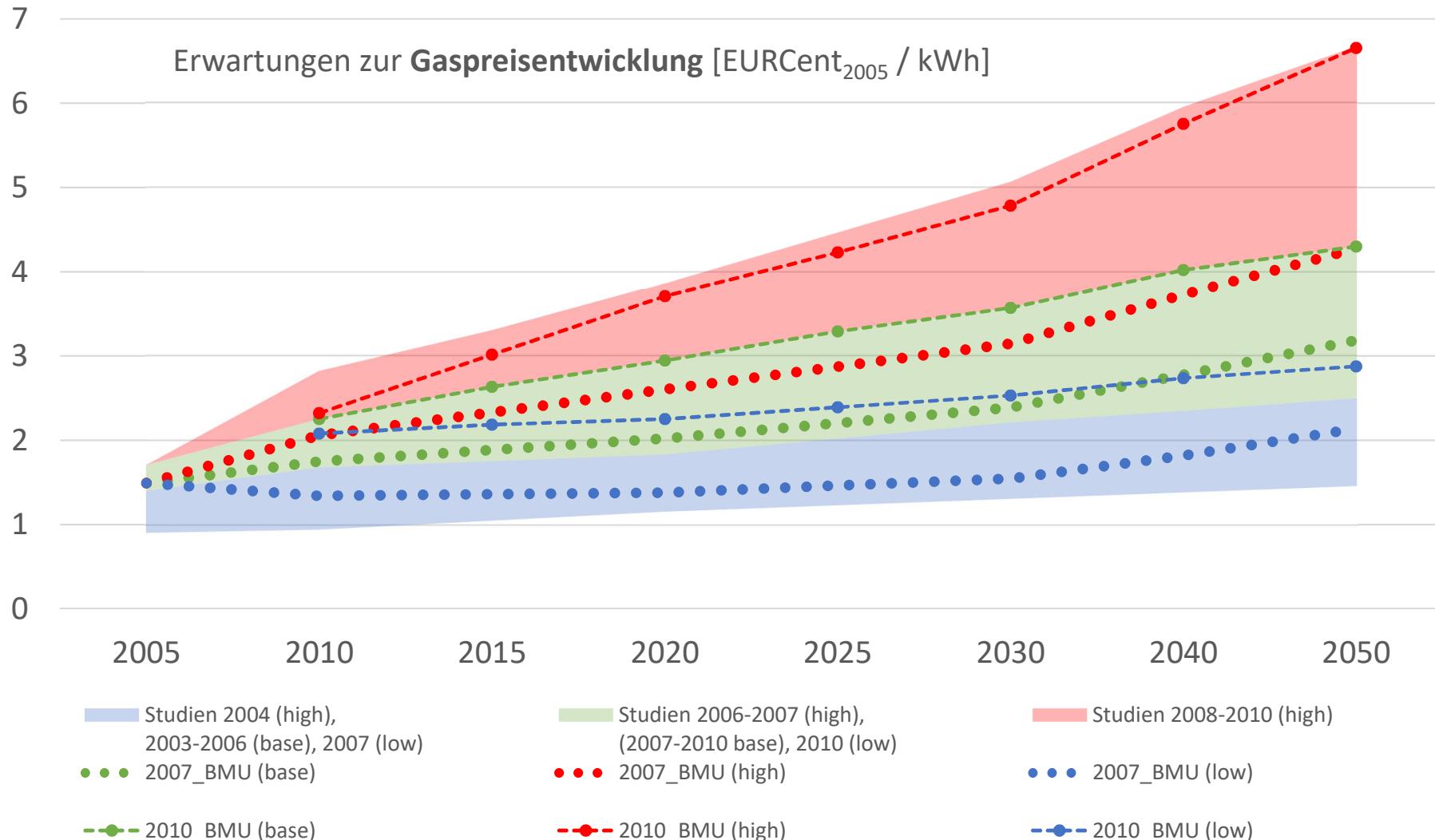
- Keine alternativen emissionsmindernden Anstrengungen zum EE-Einsatz in der Stromerzeugung (Bspw. forcierter Kohleausstieg oder höhere Anstrengungen zur Effizienzsteigerung auf der Nachfrageseite)
- Keine Abweichungen bzgl. Verfügbarkeit/Wirtschaftlichkeit neuer (in der Realität bislang nicht marktreifer) emissionsarmer konventioneller Erzeugungstechnologien (bspw. CCS)
- Keine alternativen Annahmen zum Atomausstieg für kontrafaktisches Szenario

Variationen/Sensitivitätsanalysen für eine Welt ohne deutsche EE-Stromerzeugung

- Erwartungen zur Entwicklung Energieträgerpreise
- Erwartungen zur Entwicklung CO₂-Preise
- Ggf. höhere Investitionen in verfügbare moderne/effizientere konv. Erzeugungstechnologien (höhere Planungssicherheit)

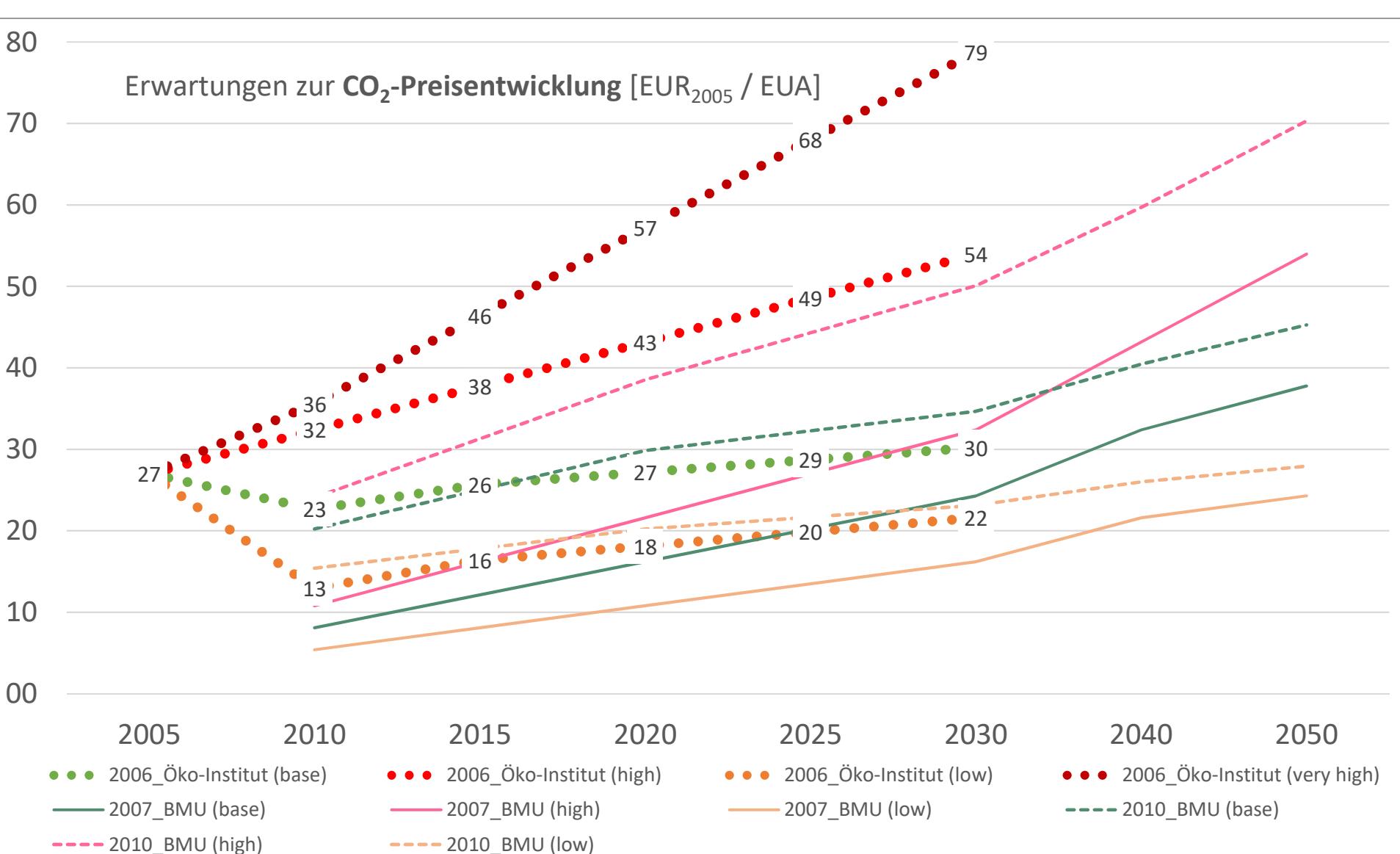
Erstellung von Alternativszenarien

Datenbasis für die damals erwartete Entwicklung von Rahmenbedingungen (aus Studien 2003 - 2010)



Erstellung von Alternativszenarien

Datenbasis für die damals erwartete Entwicklung von Rahmenbedingungen (aus Studien 2003 - 2010)



Erstellung von Alternativszenarien

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 Informationen über **Stilllegungen vor 2011** (außer für Atomkraftwerke)
- nach Rücksprache mit der BNetzA und dem BDEW nur wenige Stilllegungen vor 2011
- keine blockscharfe Dokumentation vorhanden
- Stilllegungsanzeigen erst 2011 ins Leben gerufen

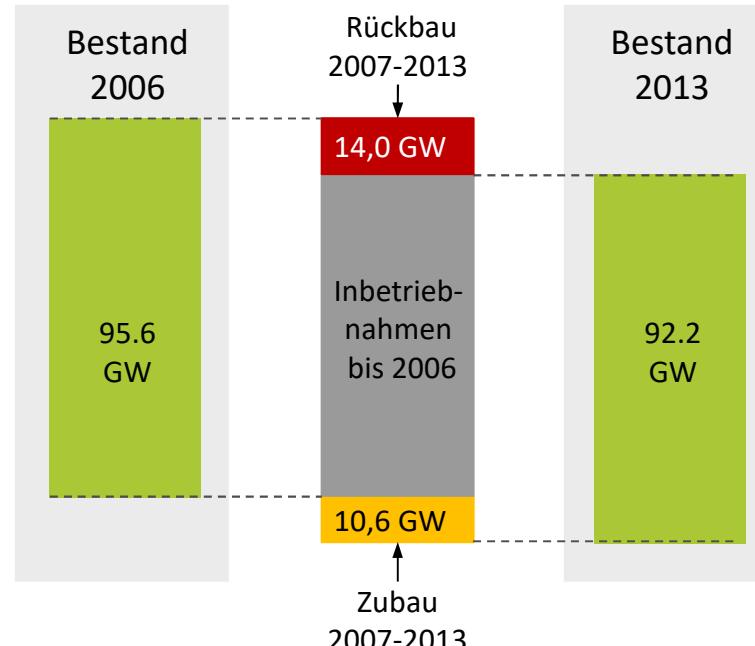
BNetzA Bundesnetzagentur
 BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH
 BDEW Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft e. V.
 UBA Umweltbundesamt

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



Erstellung von Alternativszenarien

Ermittlung des realen konventionellen Kraftwerksparks 2006 durch Rückrechnung von 2013

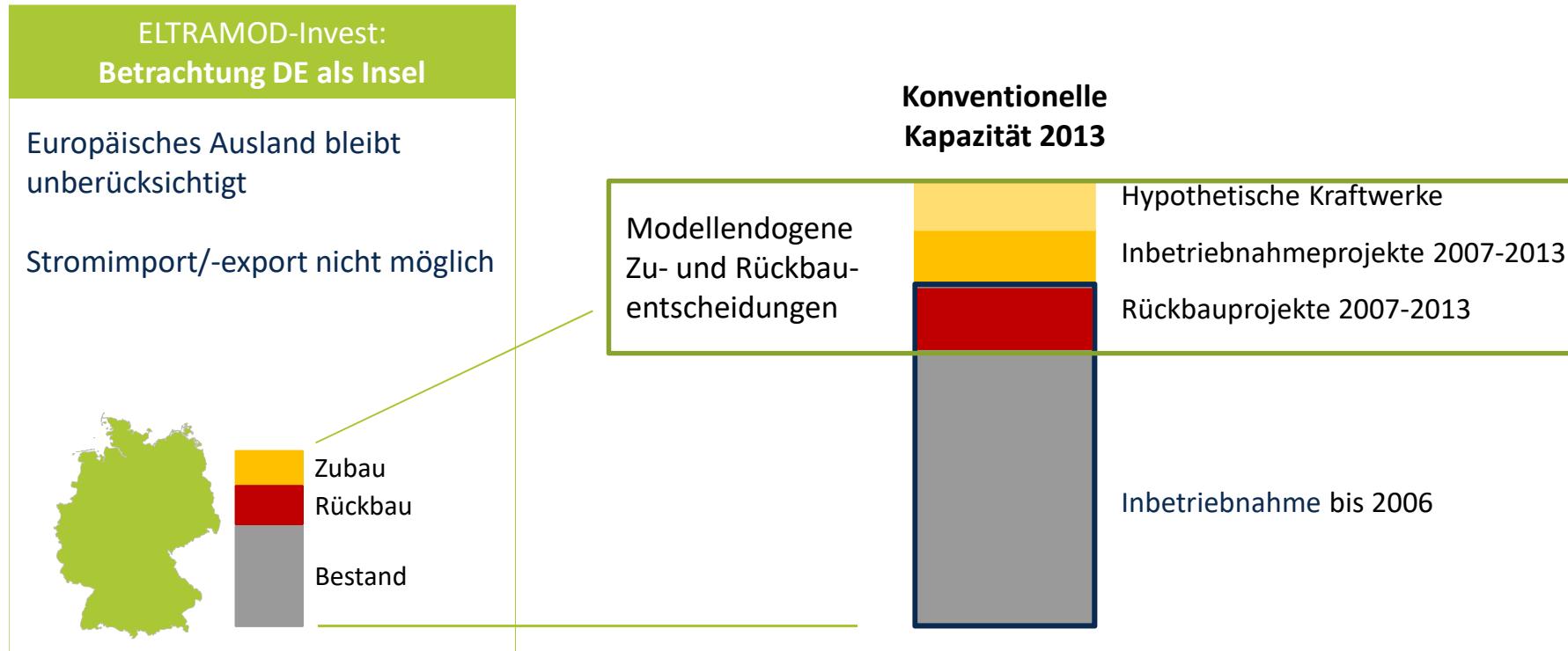


$$\text{KW-Bestand 2006} = \text{KW-Bestand 2013} + \text{Stilllegungen 2007-2013} - \text{Inbetriebnahmen 2007-2013}$$

- Kraftwerksscharfes Erzeugungsportfolio in 2006 wurde anhand des KW-Bestands in 2013 sowie der Stilllegungen und Inbetriebnahme in den Jahren 2007 – 2013 ermittelt
- Datengrundlage: Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur
- Ersatz bestehende EE-Wasserkraft durch Steinkohle-KW

Erstellung von Alternativszenarien

Ermittlung der konv. Erzeugungskapazitäten im kontrafaktischen Szenario (hypothetischer KW-Park)



- Modellendogener Rückbau auf realisierte Rückbauprojekte in Betrachtungshorizont begrenzt
- Rückbau alter Braunkohle-Kraftwerksblöcke erzwungen
- Modellendogener Zubau von realen Inbetriebnahmeprojekten im Betrachtungszeitraum möglich
 - Falls diese Projekte nicht ausreichen um Kapazitätslücke zu schließen, können hypothetische Kraftwerke zugebaut werden

Bestimmung der Substitutionseffekte

- Überblick zur Methodik
- Quantifizierung und Differenzierung der Substitutionsmengen

Bestimmung der Substitutionseffekte

Überblick zur Methodik

- Analyse der Substitutionseffekte mit Strommarktmodell
ELTRAMOD-Dispatch
- Vergleichende Gegenüberstellung eines Modellaufs mit EE (reales Szenario) und eines Modellaufs ohne EE (kontrafaktisches Szenario) auf Basis von Realdaten für Brennstoffpreise, Nachfrage und CO₂-Zertifikate
- Kalibrierung der Rechenläufe für das reale Szenario anhand tatsächlicher Erzeugungs-/Handelsdaten
- Durch Vergleich Bestimmung der Substitutionseffekte pro:
 - EE-Technologie
 - Konventionellem Energieträger
 - Land

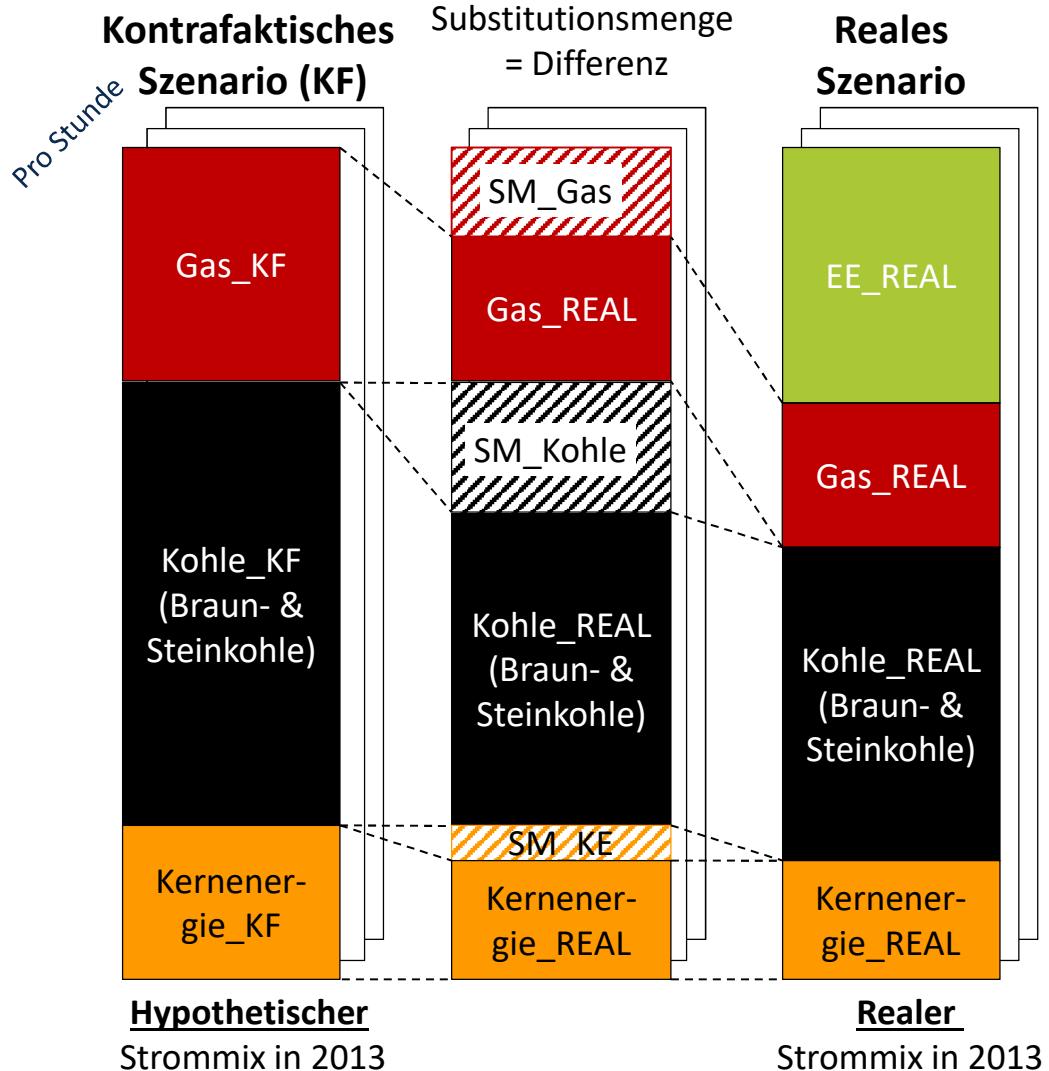
Einsatz Kraftwerkspark



- blockscharf
- aggregiert
- nicht berücksichtigt

Bestimmung der Substitutionseffekte

Quantifizierung der Substitutionsmengen



- Die Substitutionsmenge (SM) repräsentiert die verdrängte konventionelle Stromerzeugung
- Berechnung je Energieträger für jede Stunde eines Jahres:

$$SM_{t,E} = KF_ERZ_{t,E} - REAL_ERZ_{t,E}$$

- Ermittlung der Jahreswerte durch Aufsummieren der Einzelwerte:

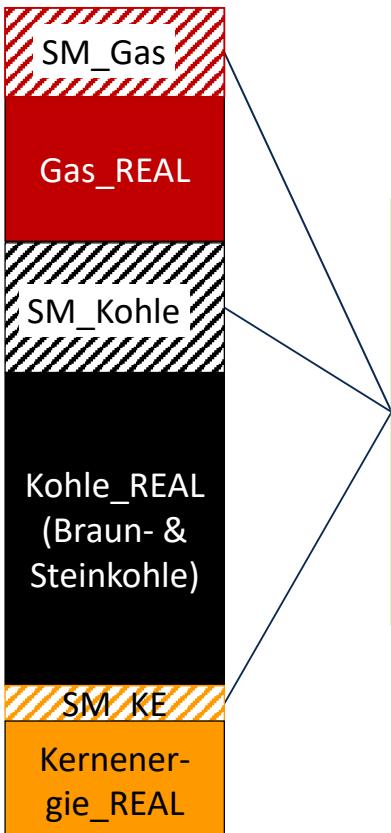
$$SM_E = \sum_t SM_{t,E}$$

SM	Substitutionsmenge
REAL_ERZ	Stromerzeugung im Realfall
KF_ERZ	Stromerzeugung im kontrafaktischen Szenario
E	Energieträger
t	Zeitschritt

Bestimmung der Substitutionseffekte

Differenzierung der Substitutionsmengen

Substitutionsmenge
= Differenz

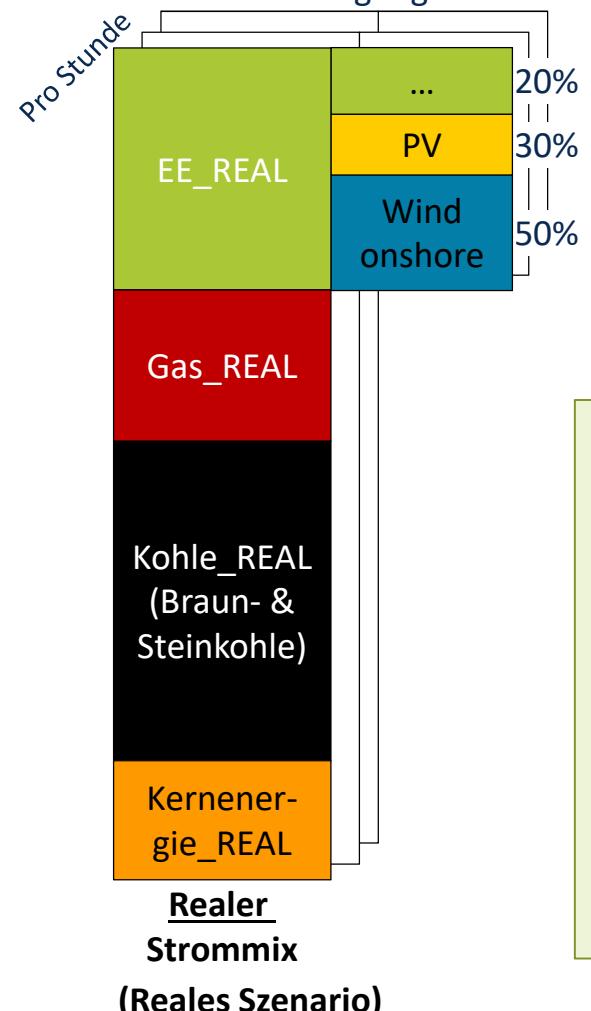


- **Technologieanteil:**
Welchen Anteil haben Wind, PV, Biomasse, etc. an der jeweiligen energieträgerspezifischen Substitutionsmenge?
- **Verteilungseffekt Ausland**
Wie verteilen sich Substitutionsmengen auf das In- und Ausland?

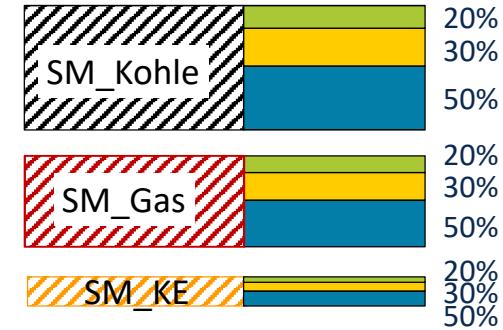
Bestimmung der Substitutionseffekte

Differenzierung der Substitutionsmengen nach einzelnen EE-Technologien

1. Berechnung der Technologieanteile an der EE-Erzeugung



2. Übertragung der EE-Anteile auf den Substitutionsmenge je Energieträger



Zahlenbeispiel für eine exemplarische Stunde:

	Stromerzeugung	Anteil	SM_Kohle	SM_Gas
Wind Onshore	90 MWh	50 %	50 MWh	40 MWh
PV	54 MWh	30 %	30 MWh	24 MWh
Biomasse	36 MWh	20 %	20 MWh	16 MWh
Summe	180 MWh		100 MWh	80 MWh

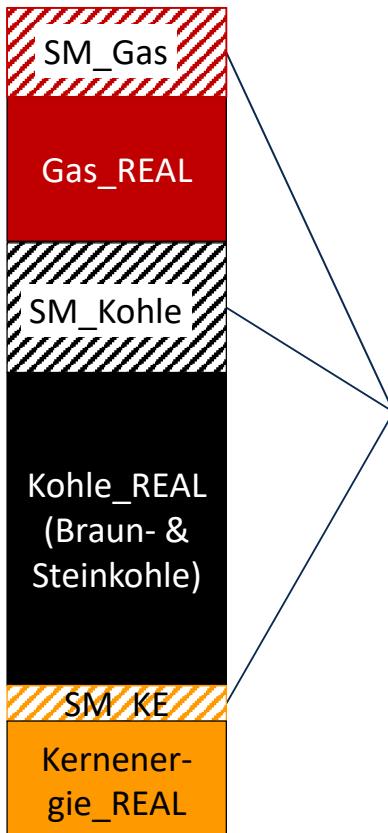
Schritt 1

Schritt 2

Bestimmung der Substitutionseffekte

Differenzierung der Substitutionsmengen

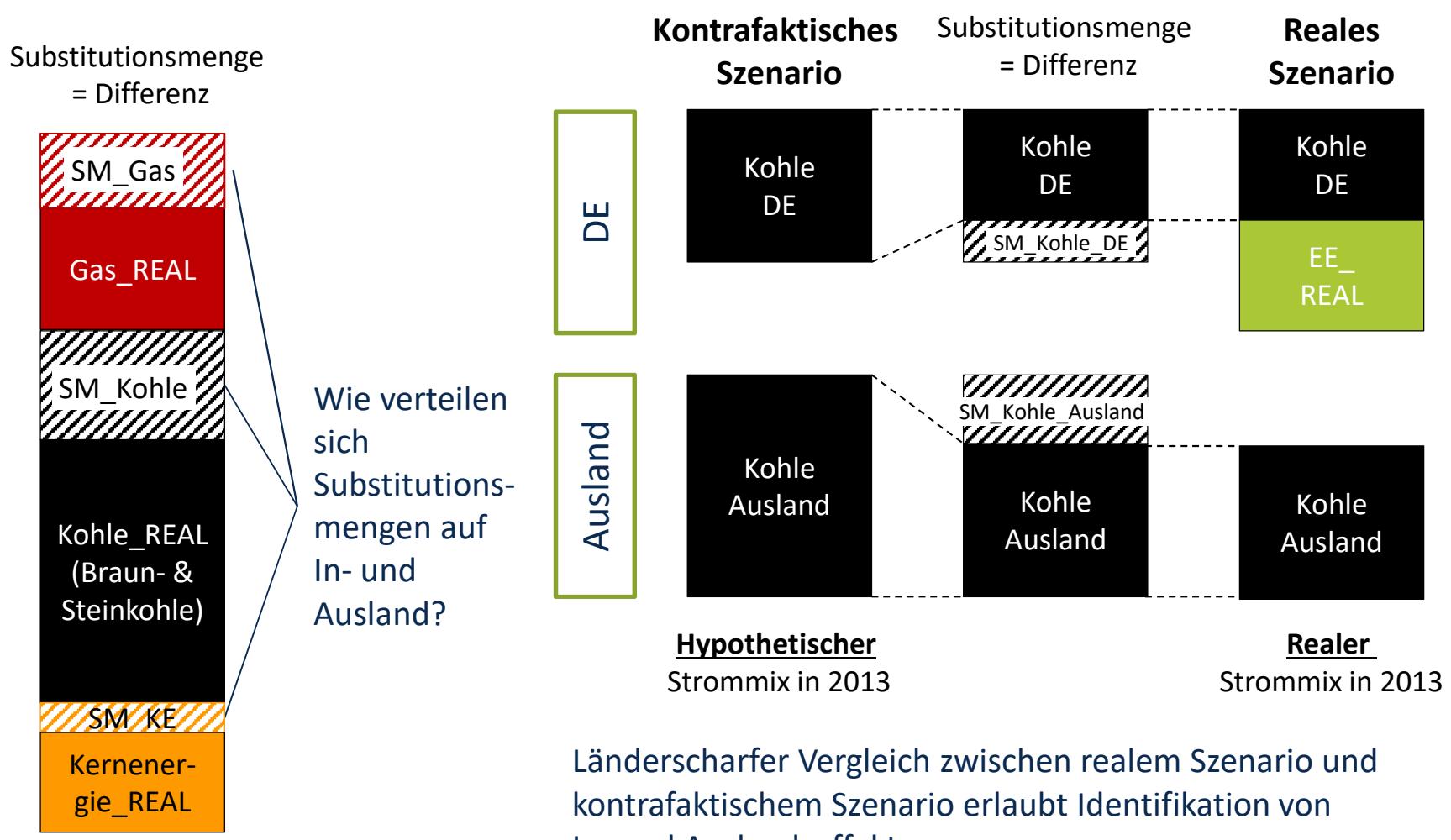
Substitutionsmenge
= Differenz



- **Technologieanteil:**
Welchen Anteil haben Wind, PV, Biomasse, etc. an der jeweiligen energieträgerspezifischen Substitutionsmenge?
- **Verteilungseffekt Ausland**
Wie verteilen sich Substitutionsmengen auf das In- und Ausland?

Bestimmung der Substitutionseffekte

Verteilung der Substitutionsmengen auf das In- und Ausland (Beispiel Kohle)



Bestimmung der Substitutionseffekte

Letztendlich Ausweisung (länderspezifisch pro Jahr):

- Anteil an verdrängter Stromeinspeisung und
- Durchschnittlicher Wirkungsgrad der verdrängten Technologien

Substitution (exemplarisch)										
	Anteil an verdrängter Stromeinspeisung [%]									
	Solar	Wind On	Wind Off	Biomasse	Wasser EE	Abfall EE	Geotherm.	Deponieg.	Klärg.	
<i>Uran</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Braunkohle</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Steinkohle</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Erdgas</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Erdöl</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Abfall konv.</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Grubeng.</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>Sonstige</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>PSP Turbine</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
<i>PSP Pumpe</i>	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%	X%
Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

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

Diekmann2007

Diekmann, J.; Krewitt, W.; Musiol, F.; Nicolosi, M.; Ragwitz, M.; Sensfuß, F.; Weber, C.; Wissen, R.; Woll, O. (2007): Fachgespräch zum Merit-Order Effekt: Agestimmtes Thesenpapier.

Sensfuß2010

Sensfuß, F. (2010): Analysen zum Merit-Order Effekt erneuerbarer Energien, Karlsruhe.

Klobasa2016

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.

Datenquellen I

2002_EK	Enquete-Kommission (2002): Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung.
2003 EC-PRIMES	European Commission (2003): European Energy and Transport. Trends to 2030.
2004_EC-PRIMES	European Commission (2004): European Energy and transport. Scenarios on key drivers.
2005 EC-PRIMES	European Commission (2005): European Energy and Transport. Trends to 2030 – update 2005.
2005_Prognos	Prognos/EWI (2007): Energierport IV – Die Entwicklung der Energiemarkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose – Kurzfassung.
2005_UBA	UBA (2005): Energiererenzszenario 2000-2020 für Emissionsberechnungen des Umweltbundesamtes.
2006_EC-PRIMES	European Commission (2006): European Energy and transport. Scenarios on energy efficiency and renewables.
2006IEA	IEA (2006): World Energy Outlook 2006.
2006Öko-Institut	Öko-Institut (2006): Auswirkung verschiedener Allokationsregeln auf Investitionen im Strommarkt
2007 EC-PPRIMES	European Commission (2007): European Energy and Transport. Trends to 2030 – update 2007.
2007_BMU	BMU (2007): Leitstudie 2007 "Ausbaustrategie Erneuerbare Energien". Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050.
2007_IER	IER Uni Stuttgart (2007): Energieprognose Bayern 2030.
2007_Prognos	Prognos/EWI Uni Köln (2007): Energieszenarien für den Energiegipfel 2007.
2008_BMU	BMU (2008): Leitstudie 2008 - Weiterentwicklung der "Ausbaustrategie Erneuerbare Energien" vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas.
2008_EC-PRIMES	European Commission (2008): Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables.
2008_ICCS	European Commission (2008): European energy and transport. Trends to 2030 – Update 2007.
2008_UBA	UBA (2008): Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung Kritische Würdigung der dena-Kurzanalyse zur Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020.

Datenquellen II

2009_TRT	TRT Trasporti e Territorio (2009): iTREN-2030 - Integrated transport and energy baseline until 2030.
2009_UBA	UBA (2009): Politikszenarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030.
2010_BMU	BMU (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Leitstudie 2010.
2010_EURELECTRIC	EURELECTRIC (2010): Power Choices Pathways to Carbon-Neutral Electricity in Europe by 2050.
2010_EWI	EWI Uni Köln (2010): iTREN-2030 - Integrated transport and energy baseline until 2030.
2010_ICCS	European Commission (2010): EU energy trends to 2030 — Update 2009.
2010IEA	IEA (2010): Projected Costs of Generating Electricity.
2010_IER	IER Uni Stuttgart (2010): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 - Energieprognose 2009.
2010_ISI	ISI (2010): iTREN-2030 - Integrated transport and energy baseline until 2030.
2013_DIW	DIW (2013): Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 20150.