

CLIMATE CHANGE

11/2016

CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien in den Jahren 2012 und 2013

Europaweite Modellierung der
Substitutionsbeziehungen unter Berücksichtigung des
deutschen Stromaußenhandels

CLIMATE CHANGE 11/2016

Sachverständigengutachten

Projektnummer 55742

UBA-FB 002287

CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien in den Jahren 2012 und 2013

Europaweite Modellierung der Substitutionsbeziehungen unter Berücksichtigung des deutschen Stromaußenhandels

von

Marian Klobasa, Frank Sensfuß

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Abschlussdatum:

November 2015

Redaktion:

Fachgebiet I 2.5 Energieversorgung und –daten, Geschäftsstelle der
Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien - Statistik
Michael Memmler

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-minderung-im-stromsektor-durch-den-einsatz>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Februar 2016

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Gutachtens werden die Substitutionswirkungen und die CO₂-Vermeidung durch die Einspeisung Erneuerbarer Energien in Deutschland analysiert, wobei die Wechselwirkungen durch den Stromaußenhandel mit den Nachbarländern Deutschlands mit berücksichtigt werden. Die Analyse erfolgt modellbasiert mit dem Strommarktsimulationsmodell PowerACE, indem zwei Szenarien einmal mit der Einspeisung Erneuerbarer Energien bzw. ohne diese Einspeisung gerechnet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die CO₂-Minderung insgesamt ca. 98 Mio. t in 2012 und ca. 104 Mio. t in 2013 erreicht. Darin ist bereits ein pauschaler Abzug für zusätzliche Emissionen, die auf Grund eines erhöhten Regelungsbedarfs des Kraftwerksparks durch fluktuierende Einspeisung unterstellt werden, berücksichtigt. Dies entspricht spezifischen CO₂-Emissionsminderungen von 0,682 kg/kWh_{el} in 2012 bzw. 0,684 kg/kWh_{el} in 2014. Die Emissionsminderungen ergeben sich durch eine Substitution von Stromerzeugung vor allem aus Steinkohlekraftwerken und zu einem geringeren Anteil aus Erdgaskraftwerken. Der Anteil Steinkohlekraftwerke liegt in 2012 bei ca. 63 % und der Erdgaskraftwerke bei 37 %. In 2013 liegt der Steinkohleanteil bei 62 % und Erdgaskraftwerke liegen bei 38 %.

Die vermiedene Erzeugung und damit die vermiedenen Emissionen werden in dem Szenariovergleich zu über 60 % in Deutschland realisiert. Der Vergleich des Außenhandels in den beiden Szenarien zeigt, dass ca. 62 TWh in 2012 und ca. 65 TWh in 2013 der Einspeisung Erneuerbarer Energien in Deutschland zu Emissionsvermeidungen im Ausland führen. Dies entspricht etwa 42 % der Erzeugungsmenge aus Erneuerbaren Energien, die zu Emissionsvermeidungen im Ausland beiträgt. In Deutschland wird vor allem Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken substituiert (ca. 82 % der substituierten Erzeugung in Deutschland), im Ausland ist der größere Anteil die Vermeidung von Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken (ca. 65 % der im Ausland substituierten Erzeugung).

Abstract

The study analysis the impact of renewable electricity generation on fossil fuel power plant operation and identifies the impact on CO₂ emissions. The analysis considers cross border energy flows from and to Germany due to the feed-in of renewable electricity. The electricity market model PowerACE is used for a simulation of the European electricity market. The impact on CO₂ emissions is derived from a scenario comparison between a model run with and without the feed-in of renewable generation.

The results of the simulation are a CO₂ reduction of 98 million tons in 2012 and 104 million tons in 2013 related to specific emission reduction of 0,682 kg/kWh_{el} in 2012 bzw. 0,684 kg/kWh_{el} in 2014. Renewable generation substitutes to 63 % resp. 62 % generation from hard coal power plants and only to 37 % resp. 38 % generation from natural gas in 2012 resp. 2013.

Only 60 % of renewable generation substitute fossil generation in Germany as more than 40 % of fossil generation is reduced in neighbouring countries. In these countries the substitution is mainly related to generation from natural gas power plants, which contribute to 65 % to the substituted generation.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1 Einleitung.....	9
2 Methodisches Vorgehen und verwendete Daten	10
2.1 Europäische Strommarktsimulation	10
2.2 Ableitung der Emissionsminderungen aus Counterfactualszenario.....	13
2.3 Datengrundlage der verwendeten Modelldaten.....	15
3 Ergebnisse der Simulationsrechnungen	19
3.1 Substitutionswirkungen in Deutschland und im Ausland	19
3.2 Vermiedene Emissionen durch die Einspeisung Erneuerbarer Energien.....	23
4 Vergleich der nationalen Simulationsergebnisse mit der europäischen Strommarktmodellierung.....	25
5 Forschungsbedarf zur Abbildung der Substitutionswirkung Erneuerbarer Energien im EU-Strommarkt	31
6 Quellenverzeichnis.....	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Stromimporte nach Deutschland und Stromexporte aus Deutschland von 2001 bis 2014	9
Abbildung 2:	Entwicklung der Import-/Export-Stromflüsse zwischen Deutschland und den Nachbarländern von 2011 bis 2013	10
Abbildung 3:	Räumliche Abgrenzung der verwendeten Strommarktsimulation.....	11
Abbildung 4:	Modellstruktur der Strommarktsimulation PowerACE Europe	12
Abbildung 5:	Ergebnis der Modellkalibrierung auf Basis der Erzeugung aus Kernenergie und Braunkohle sowie der Außenhandelssaldos für 2012	13
Abbildung 6:	Variation der Reihenfolge der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien zur Ableitung der technologiespezifischen Substitutionswirkungen	15
Abbildung 7:	Erzeugung aus Wind-, Solar- und Biomasse-Anlagen in den modellierten Nachbarländern von Deutschland in 2012 und 2013	17
Abbildung 8:	Brennstoffpreisentwicklung für Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Öl von 2008 bis 2013	18
Abbildung 9:	Entwicklung der Emissions-Zertifikate Preise von 2010 bis 2013	18
Abbildung 10:	Veränderung der Außenhandelssaldos mit Einspeisung Erneuerbarer Energien im Vergleich zum Counterfactual-Szenario nach Ländern für 2012 und 2013.....	19
Abbildung 11:	Veränderung der Außenhandelssaldos zwischen Deutschland und den Nachbarländern in 2012	20
Abbildung 12:	Veränderung der Außenhandelssaldos zwischen Deutschland und den Nachbarländern in 2013	20
Abbildung 13:	Differenz der Erzeugungsmengen in den Szenarien mit und ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien für 2012 und 2013	21
Abbildung 14:	Substitution der Erzeugungsmengen in Deutschland und im Ausland in 2012 und 2013	22
Abbildung 15:	Verteilung der Emissionsminderung auf Deutschland und die Nachbarländer in 2012 und 2013	23
Abbildung 16:	CO ₂ -Emissionsminderungen durch deutsche Einspeisung Erneuerbarer Energien außerhalb Deutschlands nach Ländern in 2012 und 2013	24
Abbildung 17:	Substitution der Stromerzeugung aus konventionellen Kraftwerken durch Erneuerbare Energien ohne Berücksichtigung veränderter Import-/Exportströme in Deutschland	26

Abbildung 18:	Vergleich Substitutionsfaktoren bei Modellierung mit und ohne Anpassung der Import-/Exportströme	27
Abbildung 19:	Vergleich der nationalen Modellierung (DE-Modell) mit den Verdrängungen in Deutschland und im Ausland in der EU-weiten Modellierung (EU-Modell)	29

Tabellenverzeichnis

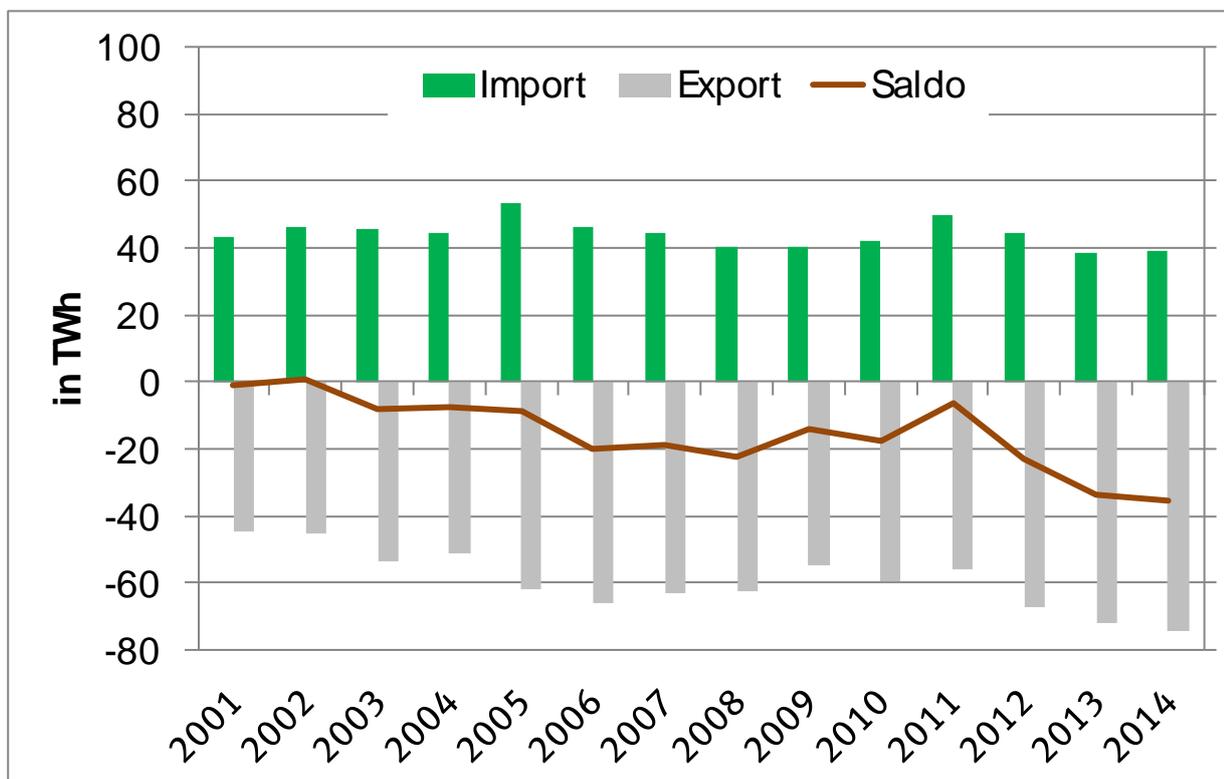
Tabelle 1:	Zusätzliche Erzeugungskapazität im Counterfactualszenario nach Brennstoff und Anlagenklasse in Deutschland	14
Tabelle 2:	Einspeisung Erneuerbarer Energien in Deutschland in 2012 und 2013 nach Technologien.....	16
Tabelle 3:	Wirkungsgrade der verdrängten Kraftwerke auf Basis von Erdgas und von Steinkohle in Deutschland und im Ausland	22
Tabelle 4:	CO ₂ -Minderungsfaktor und Substitutionsfaktoren für Erzeugung aus Steinkohle und Erdgas nach Erneuerbaren Energien Technologien	25
Tabelle 5:	Vergleich der zusätzlichen Erzeugungskapazität im Counterfactualszenario in der nationalen (DE-Modell) und EU-weiten Modellierung (EU-Modell).....	28

1 Einleitung

Im Rahmen der EU-Richtlinie 2009/28/EG berichtet die Bundesregierung Ende 2015 an die EU Kommission die voraussichtlichen Netto-Treibhausgasemissionseinsparungen durch die Nutzung erneuerbarer Energien. In der Vergangenheit sind die Einsparungen modellbasiert mit Hilfe des Energiesystemmodells PowerACE im Auftrag der AGEE-Stat ermittelt worden. Hierbei haben sich die Einsparungen aus einem Szenariovergleich des Kraftwerkbetriebs mit und ohne erneuerbare Energien abgeleitet. Dabei sind die Import- und Exportbilanzen für den deutschen Strommarkt als konstant angenommen worden.

In den letzten Jahren wird der deutsche Außenhandel zunehmend auch durch die erneuerbaren Energien beeinflusst, so dass die tatsächlichen Substitutionswirkungen zunehmend auch ausländische Kraftwerke betreffen. Während der Stromimport nach Deutschland von ca. 50 TWh in 2011 auf 38 TWh in 2013 gefallen ist, hat sich der Export von 56 TWh in 2011 auf über 72 TWh in 2013 erhöht (siehe Abbildung 1).

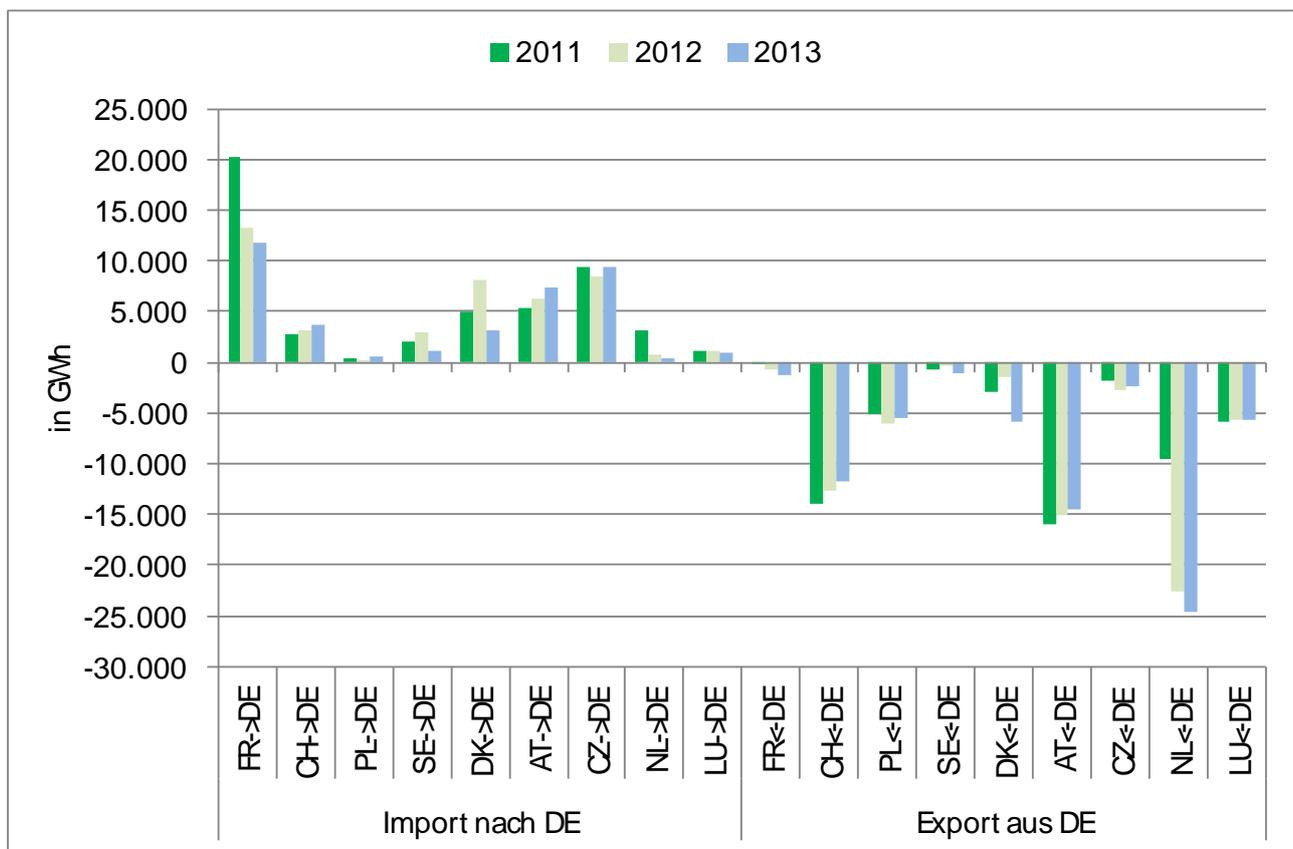
Abbildung 1: Stromimporte nach Deutschland und Stromexporte aus Deutschland von 2001 bis 2014



Quelle: BMWI 2015

Dabei sind vor allem die Importe aus Frankreich zurückgegangen und die Exporte in die Niederlande gestiegen (siehe Abbildung 2). Neben den Niederlanden sind auch größere Strommengen nach Österreich und in die Schweiz exportiert worden.

Abbildung 2: Entwicklung der Import-/Export-Stromflüsse zwischen Deutschland und den Nachbarländern von 2011 bis 2013



Quelle: ENTSO-E 2015

Vor diesem Hintergrund soll eine modellbasierte Quantifizierung der Substitutionseffekte im europäischen Strombinnenmarkt erfolgen, die einen veränderten Kraftwerkseinsatz auch in den an Deutschland angrenzenden Nachbarländern mit abbildet. Ziel ist es, systematische Erkenntnisse zu den Rückwirkungen der Import/Exportflüsse auf die Substitutionseffekte erneuerbarer Energien im europäischen Strommarkt zu gewinnen.

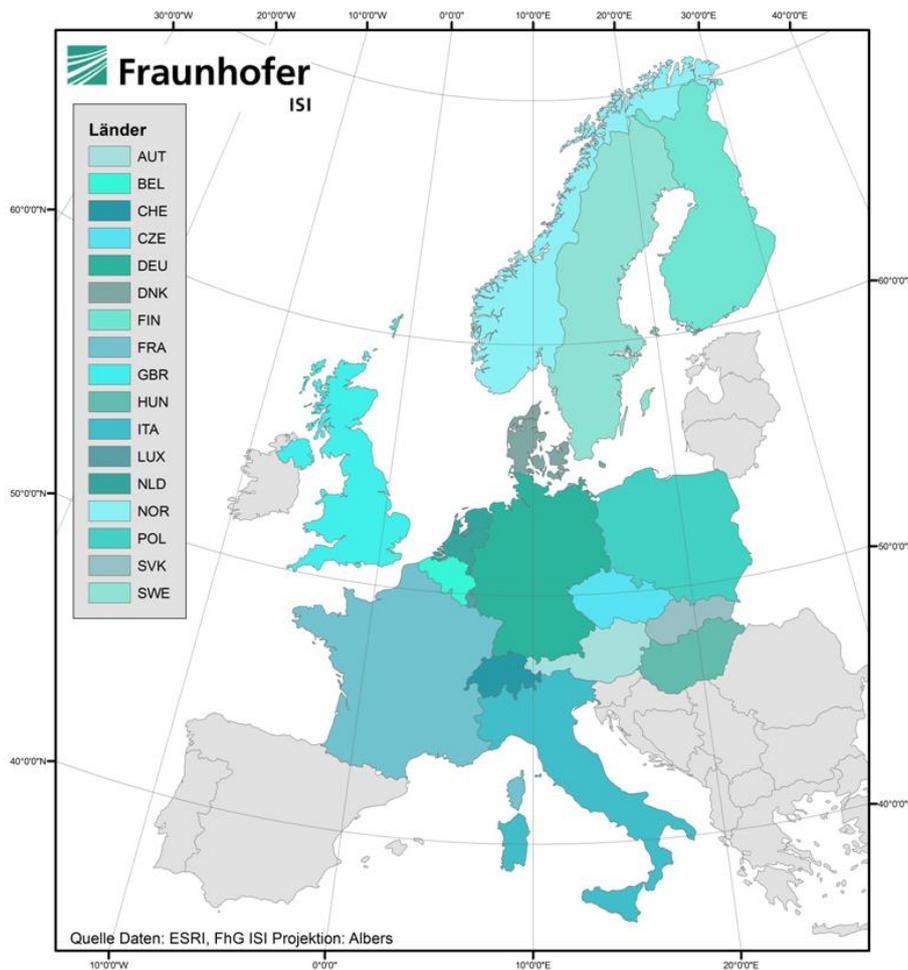
Darüber hinaus soll weiterer Forschungsbedarf zur methodischen Vorgehensweise bei der Bewertung von Substitutionseffekten im europäischen Kontext identifiziert werden.

2 Methodisches Vorgehen und verwendete Daten

2.1 Europäische Strommarktsimulation

Zur Abbildung der Substitutionswirkungen wird eine Strommarktsimulation einschließlich der Nachbarländer Deutschlands durchgeführt. Dies umfasst zusätzlich zu den direkten Nachbarn wie Frankreich, Polen und den Niederlanden auch Länder wie England, Schweden oder Norwegen (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Räumliche Abgrenzung der verwendeten Strommarktsimulation



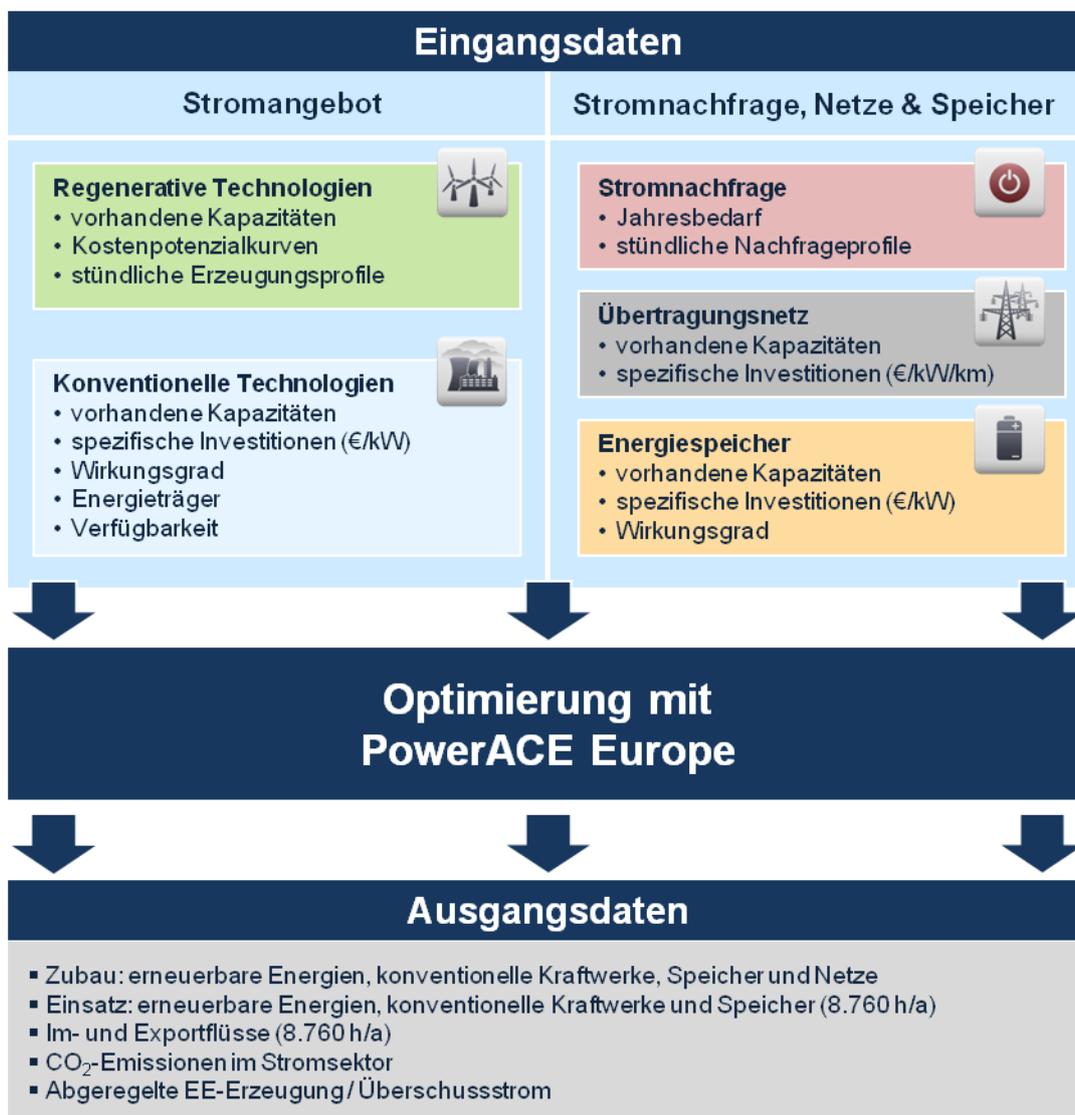
Quelle: eigene Abbildung

Als Simulationsplattform wird das Modell PowerACE Europe eingesetzt. PowerACE Europe ist ein lineares Optimierungsmodell, das zur Analyse des europäischen Stromsystems entwickelt wurde. In der Konfiguration für die vorliegende Studie werden der kostenoptimale Kraftwerkseinsatz (in stündlicher Auflösung) und die kostenoptimalen Investitionen in neue Erzeugungstechnologien unter der Annahme des vollkommenen Wettbewerbs berechnet.

Neben der Zielfunktion der Systemkostenminimierung werden im Modell zahlreiche technische und ökonomische Wirkungsmechanismen des Strommarkts beim Ausgleich von Angebot und Nachfrage über Nebenbedingungen abgebildet.

Eine belastbare Simulation der Auswirkungen der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien stellt erhebliche Anforderungen an die Qualität der zugrunde liegenden Eingangsdaten. Von besonderer Bedeutung ist eine hohe zeitliche Auflösung der Daten zur Nachfragelast und der EE-Einspeisung (siehe Abbildung 4). Für eine detailgetreue Abbildung des konventionellen Kraftwerksparks fließt eine Vielzahl von Informationen über die einzelnen Kraftwerksblöcke in die Simulation ein. Insgesamt sind in der Datenbank mehr als 1.200 Kraftwerke mit ihren wichtigsten technischen und ökonomischen Parametern (Kapazität, Kosten, Verfügbarkeit, Technologie, Brennstoff, Wirkungsgrad) enthalten.

Abbildung 4: Modellstruktur der Strommarktsimulation PowerACE Europe

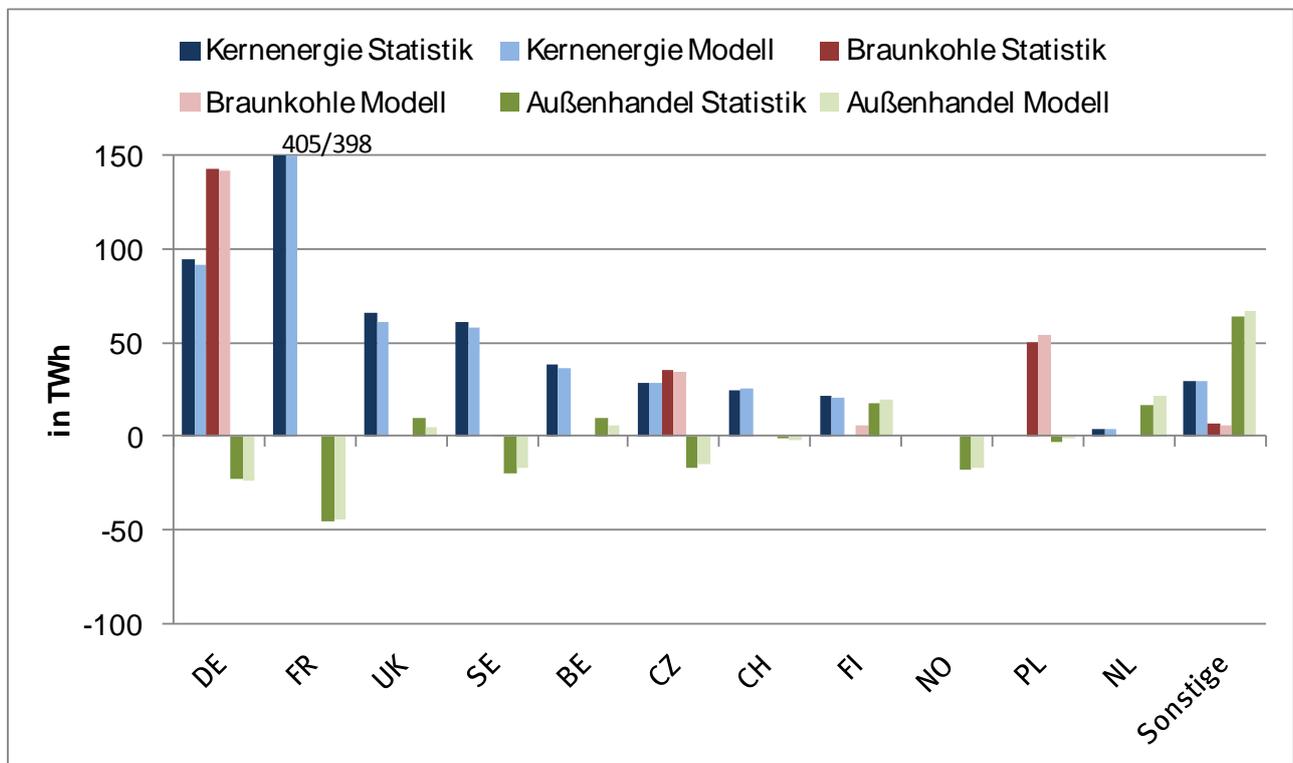


In der Simulation bildet sich der stündliche Preis an der Strombörse (Spotmarkt) aus dem Schnittpunkt von Stromangebot und -nachfrage. Auf der Angebotsseite handeln Energieversorger-Agenten die Kapazitäten ihrer konventionellen Kraftwerke und Speicher auf Basis von variablen Stromerzeugungskosten. Nach diesen Kosten richtet sich die Einsatzreihenfolge, die auch als „Merit Order“ bezeichnet wird: Zuerst kommen die Kraftwerke mit den niedrigsten Kosten zum Zuge, zuletzt die mit den Höchsten. Das Gebot des letzten Kraftwerks, das zur Deckung der Nachfrage benötigt wird, setzt den Strompreis.

Zur Kalibrierung des Modells sollen die relevantesten Handelsströme zwischen den dargestellten Ländern möglichst exakt abgebildet werden. Grundlage hierfür sind die Import-/Exportbilanzen (Außenhandelsaldo) der einzelnen Länder, da die einzelnen Interkonnektoren zwischen den Ländern nicht explizit abgebildet werden. Neben dem Außenhandelsaldo werden als weitere Kalibrierungsgrundlage auch die nationalen Erzeugungsmengen für einzelne brennstoffspezifische Kraftwerksklassen genutzt. Aus den brennstoffspezifischen Erzeugungsmengen können auf Basis anlagenscharfer Wirkungsgrade dann Emissionsmengen berechnet werden. Durch die Modellsimulation lassen

sich die Außenhandelsbilanzen der einzelnen Länder mit hoher Genauigkeit abbilden (siehe Abbildung 5). Die Differenzen zwischen Modellergebnissen und den verfügbaren Energiestatistiken zeigen für einzelne Länder Differenzen von maximal 4 TWh pro Jahr.

Abbildung 5: Ergebnis der Modellkalibrierung auf Basis der Erzeugung aus Kernenergie und Braunkohle sowie der Außenhandelssaldos für 2012



Quelle: eigene Berechnung

2.2 Ableitung der Emissionsminderungen aus Counterfactualszenario

Ausgangspunkt für die Berechnung der Emissionsminderungen ist ein Vergleich von jeweils einem Modelllauf mit Einspeisung aus Erneuerbaren Energien und einem Lauf ohne die Einspeisung. Gleichzeitig muss im Simulationslauf zu jeder Zeit sichergestellt sein, dass die Nachfrage nach Strom durch ausreichende Erzeugungskapazität gedeckt werden kann. Diese Bedingung wird für jeden Zeitschritt des Modells, das mit einer stündlichen Zeitauflösung läuft, geprüft.

Im Simulationslauf ohne die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien steht deutlich weniger Kraftwerkskapazität aus Erneuerbaren Energien zur Verfügung. Neben der verminderten fluktuierenden Erzeugungskapazität aus Wind- und PV-Anlagen stehen auch Biomasse-Anlagen sowie Wasserkraftwerke und Anlagen auf Basis von Klär- und Deponiegasen nicht zur Verfügung.

Daher wird für den Simulationslauf ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien zusätzliche Kraftwerkskapazität definiert, da es ansonsten in einzelnen Stunden nicht ausreichend Erzeugungskapazität gibt.

Die Definition der zusätzlichen Erzeugungskapazität soll dabei einen kosteneffizienten Neubau bzw. Ersatz konventioneller Erzeugungskapazität abbilden und orientiert sich daher an der durch Erneuerbare Energien substituierten konventionellen Erzeugung. Eine länderspezifische Standortoptimierung wurde im Rahmen der Modellierung nicht durchgeführt. Für die zusätzlichen Kapazitäten wird angenommen, dass diese ihren Standort in Deutschland haben.

Die zusätzliche Erzeugungskapazität setzt sich aus alten und neuen Anlagen zusammen, die Steinkohle oder Erdgas als Brennstoff einsetzen. Insgesamt ist im Counterfactual-Szenario eine zusätzliche Erzeugungsleistung von ca. 9 GW notwendig, die zu ca. 70 % von Steinkohle-Anlagen bereitgestellt wird (siehe Tabelle 1). Dabei wird unterstellt, dass ca. 55 % der zusätzlichen Steinkohleleistung aus neuen Anlagen mit einem hohen Wirkungsgrad von 45 % kommt und ca. 45 % aus alten Bestandsanlagen (die im Counterfactual länger betrieben worden wären) mit niedrigeren Wirkungsgraden von nur 35 %. Auch bei den gasbasierten zusätzlichen Kapazitäten entfällt ca. 55 % der Kapazität auf Neuanlagen mit hohen Wirkungsgraden und ca. 45 % auf alte Anlage. Zusätzlich wird bei Gaskraftwerken unterstellt, dass ein Teil der Erzeugungskapazität auf reinen Gasturbinen basiert.

Tabelle 1: Zusätzliche Erzeugungskapazität im Counterfactualszenario nach Brennstoff und Anlagenklasse in Deutschland

Kraftwerkstyp	Jahr	Leistung in MW	Wirkungsgrad
Steinkohle-Alt	2012/2013	2.800	35 %
Steinkohle	2012/2013	3.520	45 %
Gas-GuD-Alt	2012/2013	600	50 %
Gas-GuD	2012/2013	760	60 %
Gas-GT-Alt	2012/2013	600	30 %
Gas-GT	2012/2013	760	40 %
Gesamt		9.040	-

Quelle: eigene Annahmen

Zusätzlich zu der Bestimmung der Substitutionswirkungen aller Erneuerbarer Energien zusammen werden die technologiespezifischen Substitutionswirkungen aus Variationsrechnungen abgeleitet. Dazu werden nur einzelne Technologien eingeschaltet und zusätzlich auch die Reihenfolge variiert. Auf Basis der einzelnen Variationsrechnungen lassen sich dann technologiespezifische Einsparwirkungen bestimmen.

Für die Ableitung der Einsparwirkung der Windenergie wird diese zunächst als einzige Technologie eingesetzt und dann mit dem Szenario ohne Einspeisung aus Erneuerbaren Energien verglichen. In der nächsten Variationsrechnung wird dann Windenergie zusammen mit jeweils einer anderen Erneuerbaren Technologie eingesetzt (PV, Wasserkraft oder Biomasse). Daran schließt sich die Betrachtung mit der Einspeisung aus Windenergie und jeweils zwei anderen Technologien an, usw. (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Variation der Reihenfolge der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien zur Ableitung der technologiespezifischen Substitutionswirkungen

Variationsrechnungen	Reihenfolge der Erzeugung aus erneuerbaren Energien					Mittelwerte substituierte Erzeugung
	1	2	3	4	5	
1. Wind auf Position 1	Wind					M1
2. Wind auf Position 2 (4 Variationen)	PV	Wind			x	M2
	Bio1	Wind			x	
	Bio2	Wind			x	
	Wasser	Wind			x	
3. Wind auf Position 3 (6 Variationen)	Bio1, PV		Wind		x	M3
	Bio1, Wasser		Wind		x	
	
4. Wind auf Position 4 (4 Variationen)	Bio1, Bio2, Wasser			Wind	x	M4
	Bio1, Bio2, PV			Wind	x	
	Bio2, Wasser, PV			Wind	x	
	Bio1, PV, Wasser			Wind	x	
5. Wind auf Position 5	alle anderen Erneuerbaren				Wind	M5
				Endergebnis Substitution durch Wind		Mittelwert aus M1 bis M5

Quelle: eigene Annahmen

2.3 Datengrundlage der verwendeten Modelldaten

Die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland betrug in 2012 ca. 144 TWh und ist in 2013 auf ca. 152 TWh angestiegen. Diese Einspeisemengen liegen als Inputdaten den Modellläufen zugrunde. Den höchsten Beitrag stellt die Windenergie an Land mit ca. 50 TWh gefolgt von der Biomasse mit ca. 45 TWh (siehe Tabelle 2). Einen Zuwachs an Einspeisung zwischen 2012 und 2013 gab es insbesondere bei der Photovoltaik und bei der Biogas-Stromerzeugung.

Für die Modellierung wurden die Einspeisemengen im Bereich Biomasse als eine Anlagenklasse zusammengefasst. Ebenso wurden onshore und offshore Wind zur Vereinfachung und Beschleunigung der Modellläufe als eine Technologie abgebildet.

Tabelle 2: Einspeisung Erneuerbarer Energien in Deutschland in 2012 und 2013 nach Technologien

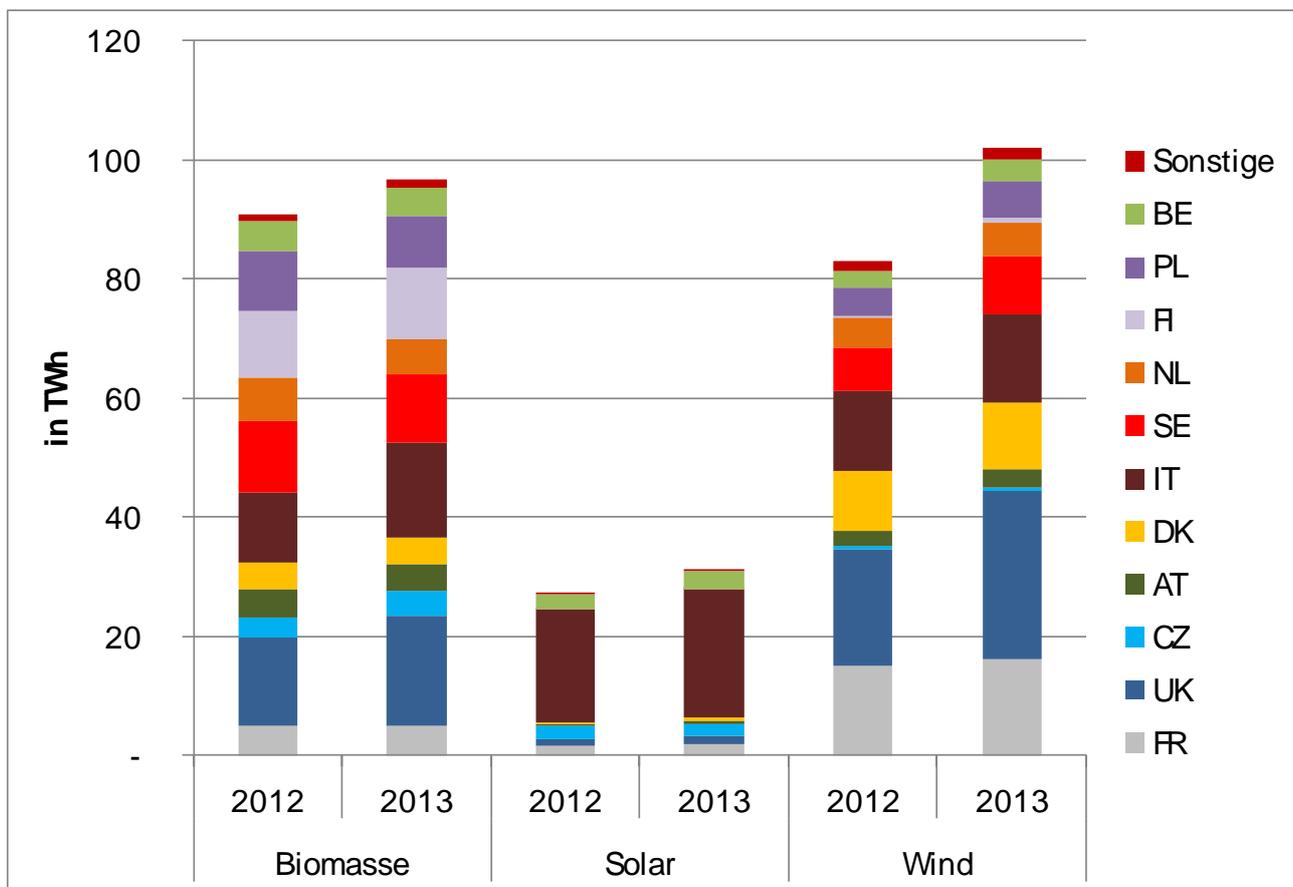
	Strommenge 2012 in GWh	Strommenge 2013 in GWh	Modelltechnisch zusammenge- fasst
Wasserkraft	22.091	22.998	Wasser
Windenergie an Land	49.948	50.803	Wind
Windenergie auf See	722	905	
Photovoltaik	26.380	31.010	PV
Biogene Festbrennstoffe (inkl. biogener Abfall)	17.041	17.058	Biomasse
Biogene flüssige Brennstoffe	350	279	
Biogas	25.390	27.452	
Klär- und Deponiegas	1.852	1.782	
Geothermie	25	80	
Gesamt	143.799	152.367	

Quelle: AGEE-Stat2015

Die Strommarktsimulation läuft auf stündlicher Basis und verwendet daher stündlich aufgelöste Zeitreihen der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien für Deutschland und auch die Nachbarländer. Als Datenquelle werden für die Simulation Veröffentlichungen der jeweiligen Netzbetreiber genutzt. In Deutschland wird die Einspeisezeitreihe für Wind- und Solaranlagen durch die vier ÜNBs veröffentlicht (ÜNBs 2015). In den meisten Nachbarländern stehen Einspeiseprofile der Erneuerbaren Energien ebenfalls als Zeitreihen zur Verfügung (RTE 2015, Terna 2015, Energienet.dk 2015, Nordpool 2015, BMRS 2015)

Die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien in den modellierten Nachbarländern Deutschlands lag insgesamt in 2012 bei ca. 323 TWh aus Wind-, Solar- und Biomasse-Anlagen und in 2013 bei ca. 359 TWh. Den größten Beitrag lieferte in 2012 die Biomasse und in 2013 die Windenergie. Die größten Erzeugungsmengen im Bereich Biomasse und Wind wurden in UK erzeugt, bei der Solarenergie lag die höchste Erzeugung in Italien (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Erzeugung aus Wind-, Solar- und Biomasse-Anlagen in den modellierten Nachbarländern von Deutschland in 2012 und 2013

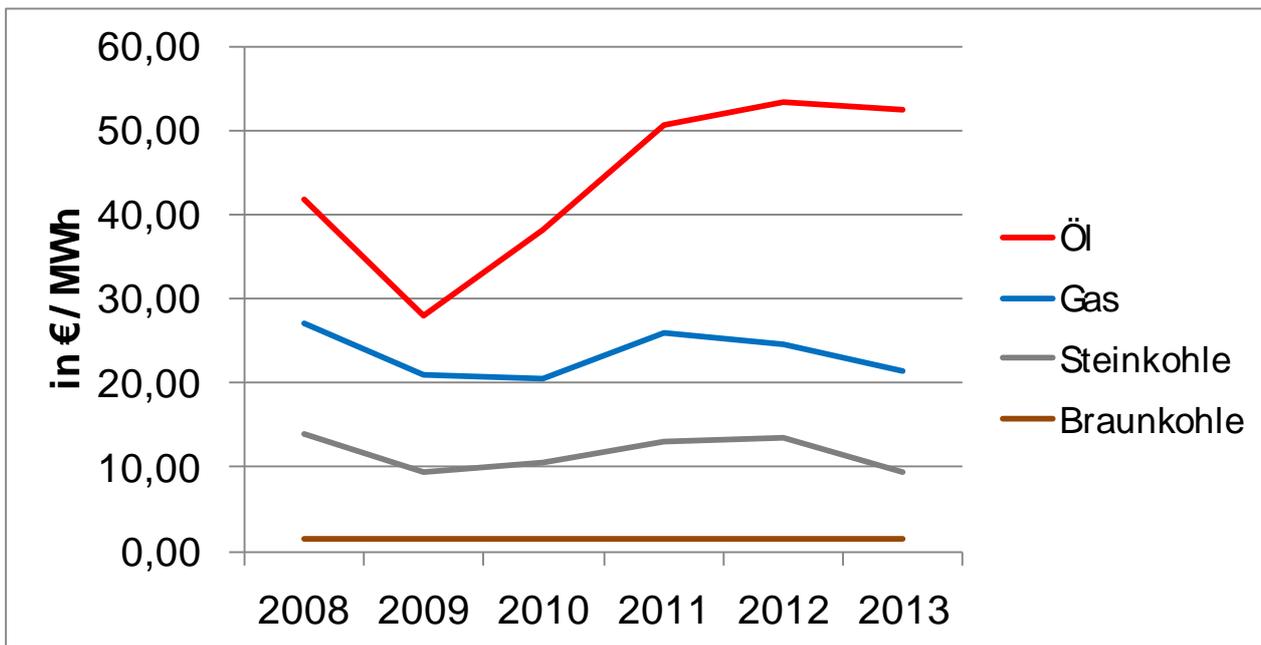


Quelle: ENTSO-E 2015

Als ökonomische Inputdaten für die Modellierung des Kraftwerkseinsatzes sind die aktuellen Brennstoffpreise sowie Emissions-Zertifikatspreise für 2012 und 2013 eingeflossen. Seit 2011 ist der Gaspreis leicht rückläufig gewesen (siehe Abbildung 8). Der Preis für Steinkohle ist in 2012 nochmals leicht gestiegen und in 2013 dann analog zum Gaspreis gefallen. Für Braunkohle wird mit einem konstanten Brennstoffpreis gerechnet.

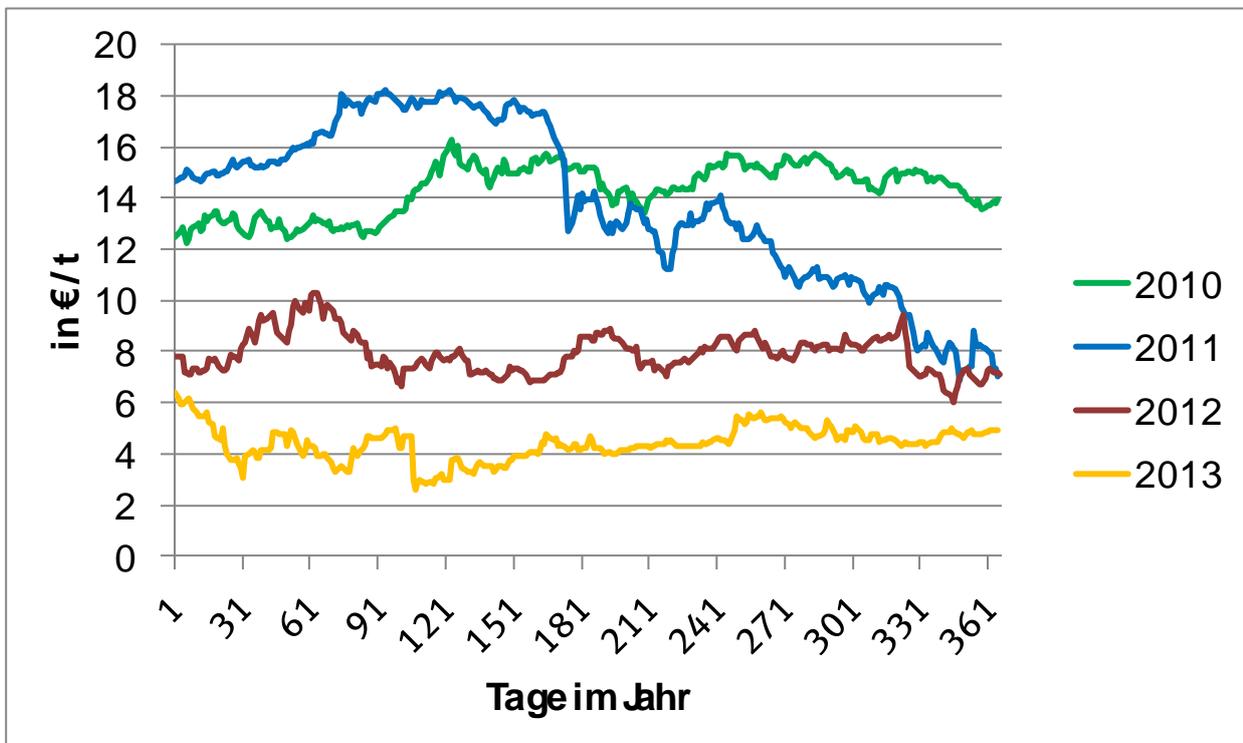
Die Preise für Emissions-Zertifikate sind in 2011 gefallen und lagen in 2012 bei einem Preis von ca. 8 €/t. Der Preis ist in 2013 nochmals auf unter 6 €/t gesunken (siehe Abbildung 9).

Abbildung 8: Brennstoffpreisentwicklung für Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Öl von 2008 bis 2013



Quelle: VIK 2015

Abbildung 9: Entwicklung der Emissions-Zertifikate Preise von 2010 bis 2013



Quelle: EEX 2015

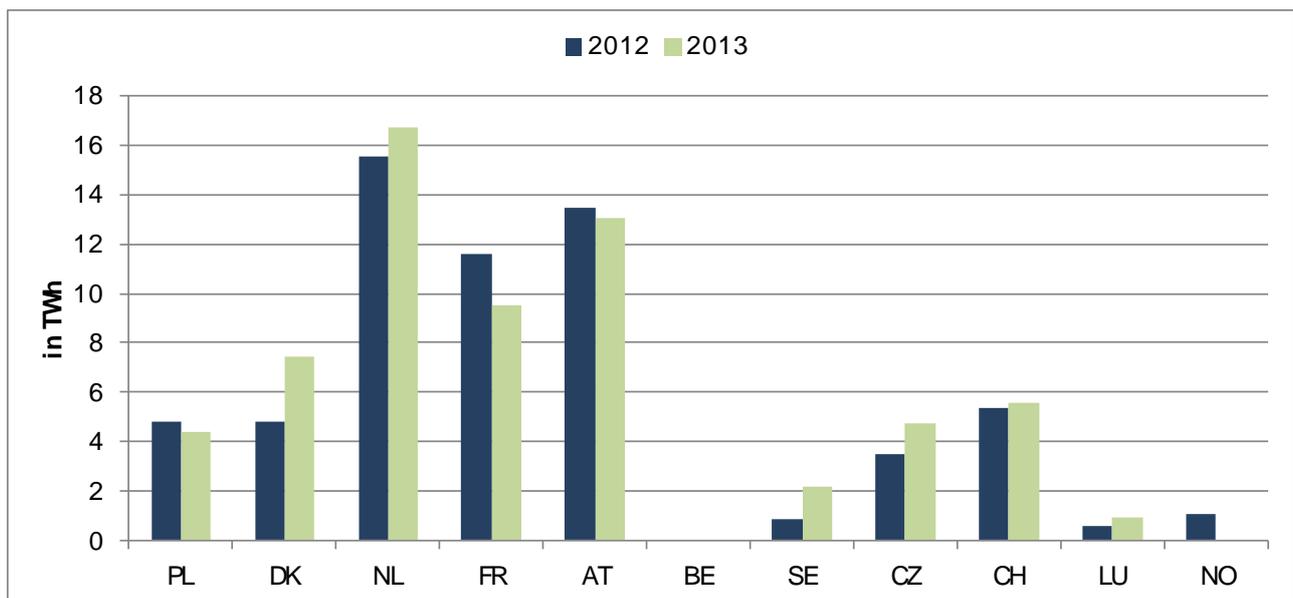
3 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

3.1 Substitutionswirkungen in Deutschland und im Ausland

Die Modellergebnisse zeigen, dass die Einspeisung Erneuerbarer Energien einen großen Einfluss auf die Import- und Exportflüsse in Deutschland hat. Ein Vergleich der Szenarien mit und ohne die Einspeisung Erneuerbarer Energien zeigt, dass Deutschland von einem Netto-Exporteur von Strom im Szenario mit Einspeisung Erneuerbarer Energien zu einem Netto-Importeur von Strom wird. In 2012 werden im Szenario mit Einspeisung Erneuerbarer Energien ca. 61 TWh mehr exportiert als im Szenario ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien. In 2013 unterscheidet sich der Netto-Import um ca. 65 TWh zwischen den beiden Szenarien mit und ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien.

Die Veränderungen der Exportmengen in den Szenarien mit und ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien wirken sich nach der Modellrechnung vor allem auf die Niederlande, Frankreich und Österreich aus, die zwischen 10 und 17 TWh zusätzliche Erzeugung aus Deutschland erhalten. Der Außenhandelssaldo aus Deutschland steigt von 2012 auf 2013 leicht an. Diese zusätzlichen Exportströme, die in 2013 entstehen, gehen zu großen Teilen in die Niederlande, Dänemark und nach Tschechien. Im Szenario mit Erneuerbaren Energien liegt der Außenhandelssaldo in die Niederlande knapp 16 TWh in 2012 bzw. etwa 17 TWh in 2013 höher als im Counterfactual-Szenario ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien (siehe Abbildung 10).

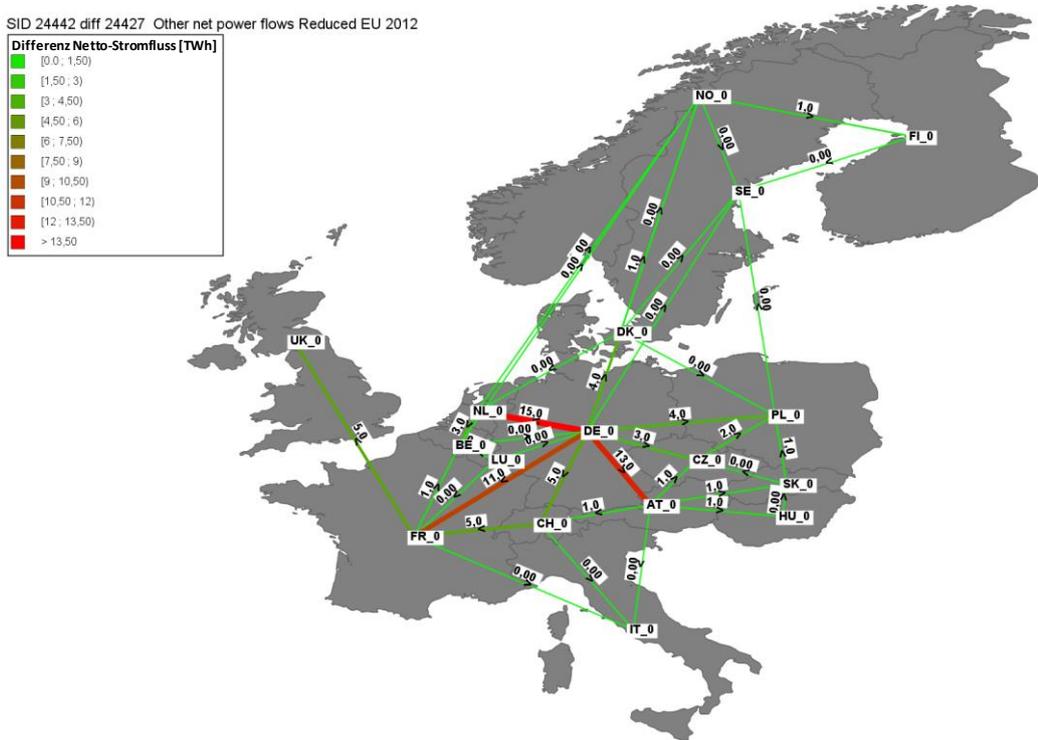
Abbildung 10: Veränderung des Außenhandelssaldos mit Einspeisung Erneuerbarer Energien im Vergleich zum Counterfactual-Szenario nach Ländern für 2012 und 2013



Quelle: eigene Berechnungen

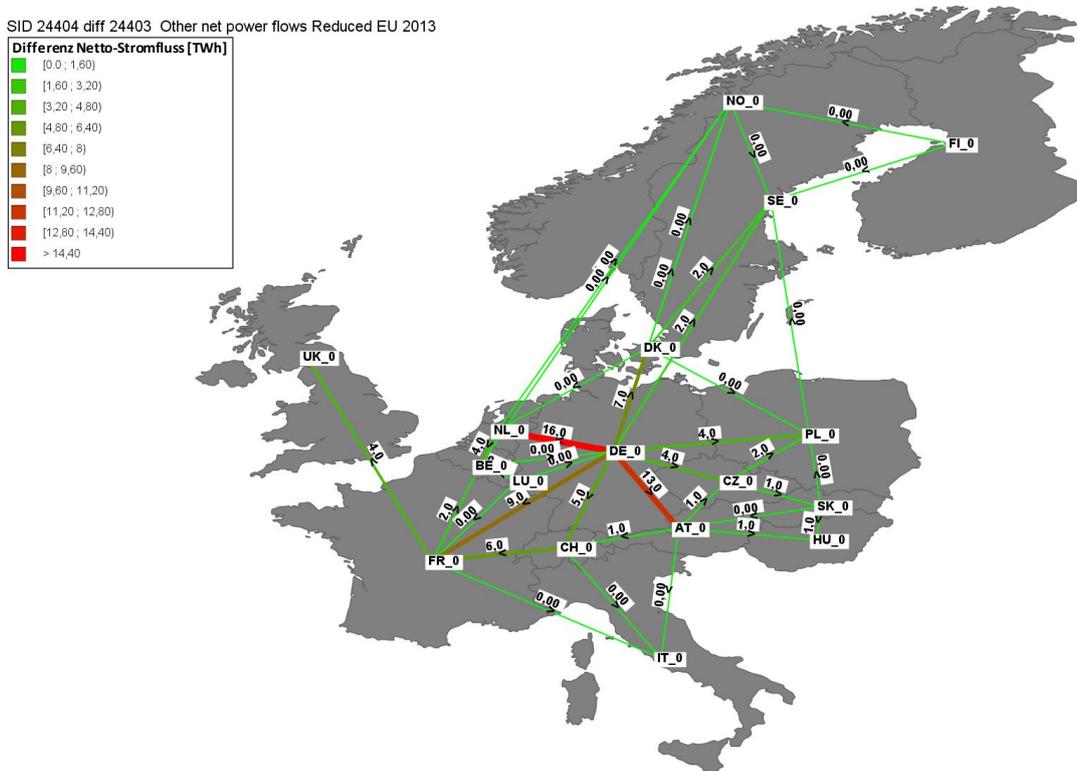
Neben den direkten Importen aus Deutschland in die Nachbarländer ändert sich auch der Stromfluss zwischen den Ländern innerhalb Europas. So steigen die Importe auch aus Belgien und der Schweiz nach Frankreich durch die Einspeisung Erneuerbarer Energien in Deutschland. Gleichzeitig erhöht sich der Export von Frankreich nach England um 5 TWh in 2012 bzw. 4 TWh in 2013 (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).

Abbildung 11: Veränderung der Außenhandelssaldos zwischen Deutschland und den Nachbarländern in 2012



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 12: Veränderung der Außenhandelssaldos zwischen Deutschland und den Nachbarländern in 2013

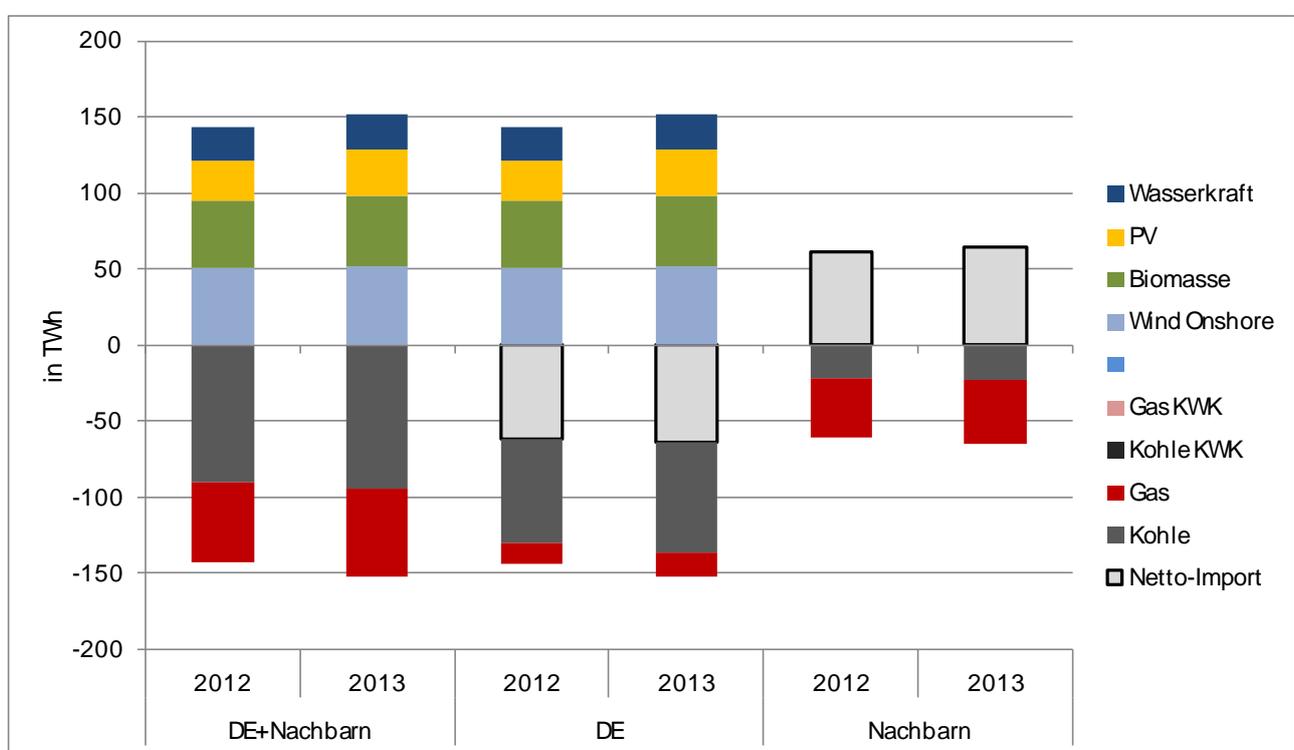


Quelle: eigene Darstellung

Die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien substituiert Erzeugung aus Gas- und Steinkohlekraftwerken (siehe Abbildung 13). In 2012 sind zu ca. 63 % Erzeugungsmengen aus Kraftwerken auf Basis von Steinkohle substituiert worden und zu ca. 37 % Erzeugungsmengen auf Basis von Erdgaskraftwerken. In 2013 verteilte sich die substituierte Erzeugung zu 62 % auf Steinkohlekraftwerke und zu 38 % auf Erdgas.

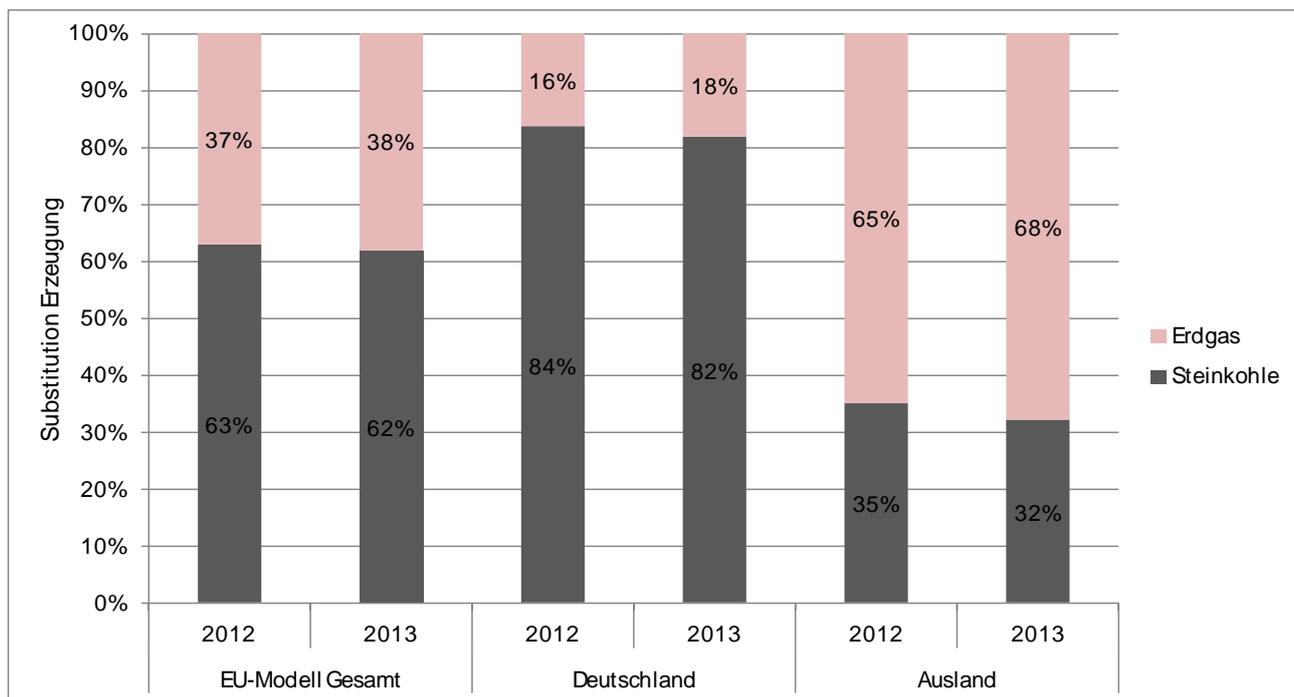
Die Modellergebnisse zeigen, dass in 2012 ca. 57 % der konventionellen Erzeugung in Deutschland substituiert wird und ca. 43 % im Ausland. In 2013 verringert sich der Anteil der Verdrängung im Ausland auf ca. 42 % und ca. 58 % verbleiben in Deutschland. Die substituierte Erzeugung ist in Deutschland vornehmlich Erzeugung aus Kraftwerken auf Steinkohlebasis (in 2012 ca. 84 % und in 2013 ca. 82 %). Im Ausland wird dagegen vornehmlich Erzeugung aus Kraftwerken auf Basis von Erdgas verdrängt (siehe Abbildung 14). Die substituierte Stromerzeugung kommt in 2012 im Ausland zu 65 % aus Erdgaskraftwerken. In 2013 steigt der Anteil auf ca. 68 %.

Abbildung 13: Differenz der Erzeugungsmengen in den Szenarien mit und ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien für 2012 und 2013



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 14: Substitution der Erzeugungsmengen in Deutschland und im Ausland in 2012 und 2013



Quelle: eigene Berechnungen

Die substituierten Kraftwerke unterscheiden sich ebenfalls zwischen Deutschland und dem Ausland. Substituierte Erdgaskraftwerke sind vornehmlich GuD-Kraftwerke, die in Deutschland einen Wirkungsgrad von über 50 % haben (siehe Tabelle 3). Im Ausland werden im Mittel Kraftwerke mit etwas niedrigerem Wirkungsgrad verdrängt. Die verdrängten Steinkohlekraftwerke erreichen Wirkungsgrade von über 37 % in Deutschland und zwischen 35 % und 36 % im Ausland.

Tabelle 3: Wirkungsgrade der verdrängten Kraftwerke auf Basis von Erdgas und von Steinkohle in Deutschland und im Ausland

Verdrängte Kraftwerke	Jahr	DE	Ausland	Gesamt
Verdrängung Gas	2012	52,6 %	52,6 %	52,6 %
	2013	55,9 %	53,9 %	54,5 %
Verdrängung Steinkohle	2012	37,6%	36,0 %	37,2 %
	2013	37,0%	35,0%	36,5%

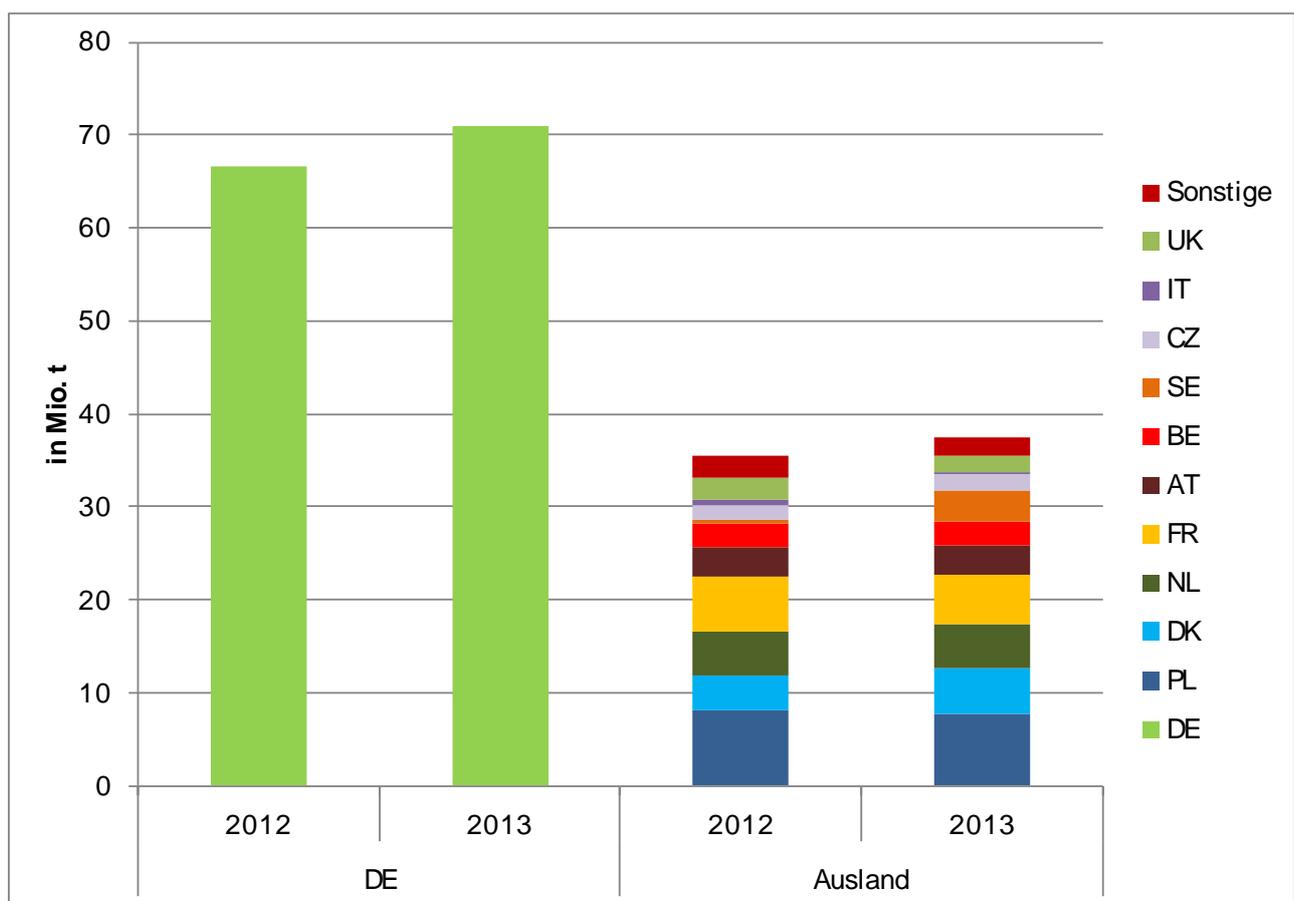
Quelle: eigene Berechnungen

3.2 Vermiedene Emissionen durch die Einspeisung Erneuerbarer Energien

Die vermiedenen CO₂-Emissionen liegen in 2012 bei ca. 102 Mio. t bzw. bei ca. 98 Mio. t, wenn man pauschal auf Grund einer stärkeren Regelung der konventionellen Kraftwerke etwas schlechtere Wirkungsgrade im Szenario mit Einspeisung Erneuerbarer Energien unterstellt. In 2013 steigen die vermiedenen Emissionen auf 108 Mio. t an bzw. auf 104 Mio. t, wenn man pauschal einen Abzug für stärkeren Regelungsbetrieb berücksichtigt. Die Modellsimulation zeigt, dass ein Großteil von über 65 % der vermiedenen Emissionen in 2012 auf eine veränderte Erzeugung in Deutschland zurückzuführen ist. An zweiter und dritter Stelle folgen dann Polen und Frankreich mit 8 % bzw. 6 % der vermiedenen Emissionen. Die restlichen Einsparungen verteilen sich auf weitere 9 Länder (siehe Abbildung 15).

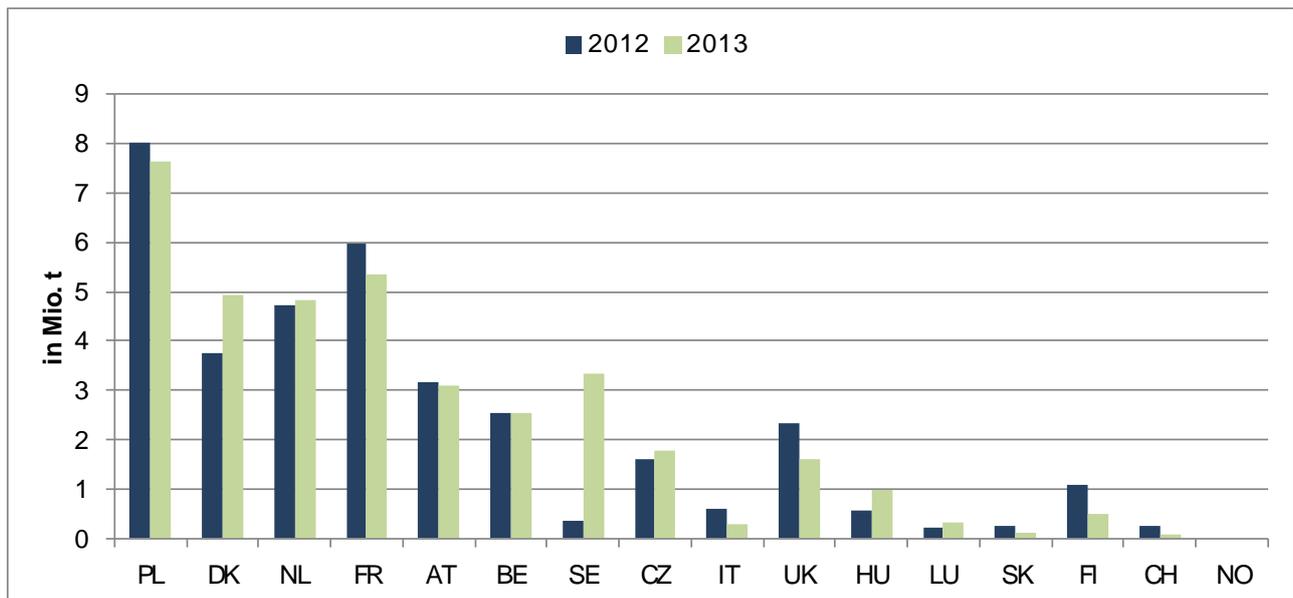
In 2013 entfällt ebenfalls ca. 65 % der vermiedenen Emissionen auf Deutschland. In etwa 7 % der vermiedenen Emissionen entfallen auf Polen. In 2013 werden in Dänemark und Schweden mehr Emissionen als in 2012 vermieden. Die vermiedenen Emissionen spiegeln auch die unterschiedlichen Kraftwerksparkstrukturen in den einzelnen Ländern wieder. Obwohl die Exportströme in die Niederlande deutlich größer sind als nach Polen, werden dennoch in Polen mehr CO₂-Emissionen vermieden als in den Niederlande (siehe Abbildung 16). Ursache dafür ist die CO₂-Intensität der Stromerzeugung, die durch die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien substituiert wird.

Abbildung 15: Verteilung der Emissionsminderung auf Deutschland und die Nachbarländer in 2012 und 2013



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 16: CO₂-Emissionsminderungen durch deutsche Einspeisung Erneuerbarer Energien außerhalb Deutschlands nach Ländern in 2012 und 2013



Quelle: eigene Berechnungen

Insgesamt liegen die Emissionsminderungen bei der Betrachtung einschließlich der Außenhandelsströme in 2012 bei 0,710 kg/kWh in 2012 und bei ca. 0,711 kg/kWh in 2013. Zieht man pauschal einen Teil der Emissionsminderungen auf Grund von zusätzlichem Regelbedarf beim Netzbetrieb mit einem höheren Anteil fluktuierender Einspeisung wieder ab, dann ergeben sich Minderungsfaktoren von 0,682 kg/kWh in 2012 und 0,684 kg/kWh in 2013. Hierbei wird für die Einspeisung aus Wind- und PV-Anlagen 7 % der ermittelten Emissionseinsparung als Kompensation für einen erhöhten Regelbedarf abgezogen (Roth 2005; Klobasa 2007).

Betrachtet man die Emissionsminderungen im Verhältnis zu den Einspeisemengen aus Erneuerbaren Energien in Deutschland bzw. die Exportmengen in Bezug auf die Emissionsminderungen in den Nachbarländern, dann liegen diese bei ca. 0,810 kg/kWh in Deutschland und bei ca. 0,580 kg/kWh im Ausland. Hier zeigt sich, dass national vor allem Steinkohle substituiert wird und im Ausland verstärkt Gaskraftwerke von einer Substitution betroffen sind.

Eine Aufteilung auf die einzelnen Erneuerbaren Energien Technologien weist etwas höhere Emissionsminderungen für Biomasse und Wasserkraft von 0,719 kg/kWh bzw. 0,716 kg/kWh in 2012 und 0,714 kg/kWh bzw. 0,706 kg/kWh in 2013 aus (siehe Tabelle 4). Bei Wind und PV fallen die spezifischen Einsparfaktoren etwas geringer aus und liegen bei 0,673 kg/kWh bzw. 0,659 kg/kWh in 2012 und 0,669 kg/kWh bzw. 0,651 kg/kWh in 2013.

Tabelle 4: CO₂-Minderungsfaktor und Substitutionsfaktoren für Erzeugung aus Steinkohle und Erdgas nach Erneuerbaren Energien Technologien

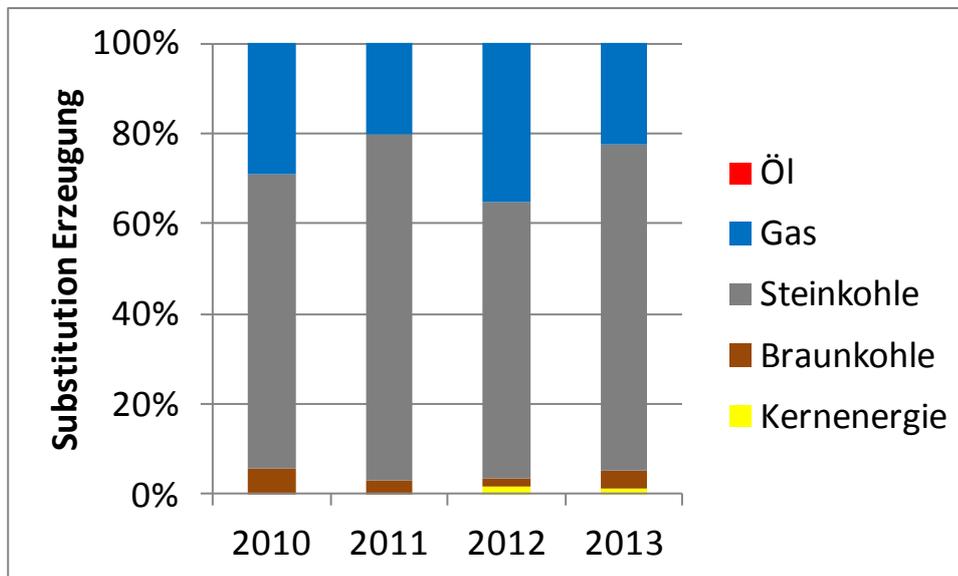
	CO ₂ -Minderungsfaktor [kg/kWh _{el}]	Substitutionsfaktor Steinkohle	Substitutionsfaktor Erdgas
2012			
Wasserkraft	0,716	66 %	34 %
Windkraft	0,673	62 %	38 %
PV	0,659	61 %	39 %
Biomasse	0,719	67 %	33 %
Gesamt	0,682	63 %	37 %
2013			
Wasserkraft	0,706	64 %	36 %
Windkraft	0,669	61 %	39 %
PV	0,651	59 %	41 %
Biomasse	0,714	65 %	35 %
Gesamt	0,684	62 %	38 %

Quelle: eigene Berechnungen

4 Vergleich der nationalen Simulationsergebnisse mit der europäischen Strommarktmodellierung

Die Berechnung der CO₂-Minderung durch die Einspeisung Erneuerbarer Energien ohne eine Berücksichtigung der veränderten Import- und Exportströme Deutschlands wurde in Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Erneuerbaren Energien Statistik in einem eigenen Gutachten ermittelt (Klobasa, Sensfuß 2015). Die Ergebnisse der nationalen Modellierung (DE-Modell) für die letzten Jahre zeigen, dass ein Großteil der Emissionsvermeidung durch Erneuerbare Energien auf der Substitution von Stromerzeugung aus Steinkohle- und Gaskraftwerken beruht (siehe Abbildung 17). Als relevante Einflussgrößen spielen dabei die Einspeisung Erneuerbarer Energien insgesamt als auch die Höhe der Brennstoffkosten (inklusive Kosten für Emissionszertifikate) eine Rolle.

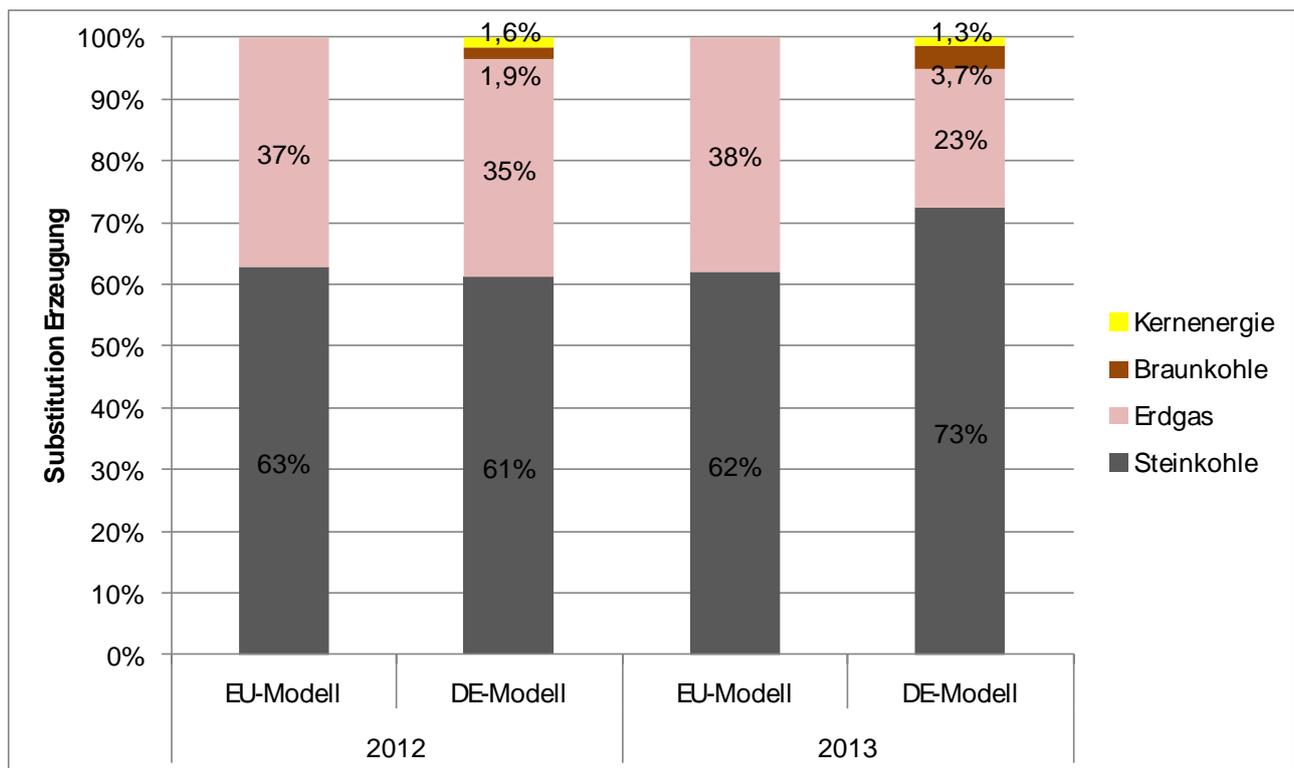
Abbildung 17: Substitution der Stromerzeugung aus konventionellen Kraftwerken durch Erneuerbare Energien ohne Berücksichtigung veränderter Import-/Exportströme in Deutschland



Quelle: Klobasa/Sensfuß 2015

Betrachtet man die Verdrängung unter Berücksichtigung der veränderten Import-/Exportflüsse, dann stellt sich in 2012 ein sehr ähnliches Bild wie bei einer nationalen Modellierung ohne eine Veränderung der Exportströme (siehe Abbildung 18). Insgesamt werden etwas mehr als 60 % an Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken verdrängt. In 2013 wird dagegen ohne Berücksichtigung der veränderten Exportströme deutlich mehr Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken verdrängt als in den Modellrechnungen, die angrenzende Nachbarländer mit berücksichtigen. Die substituierte Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken liegt bei ca. 62 % im Vergleich zu über 72 % bei einer rein nationalen Betrachtung.

Abbildung 18: Vergleich Substitutionsfaktoren bei Modellierung mit und ohne Anpassung der Import-/Exportströme



Quelle: eigene Berechnungen

Die Ergebnisse zeigen, dass in 2012 ca. 82 TWh aus Erneuerbaren Energien zu Emissionsminderungen in Deutschland geführt haben. Die verbleibenden 61 TWh aus Erneuerbaren Energien haben zu Emissionsminderungen im Ausland geführt. Ein vergleichbares Bild ergibt sich auch für 2013, in dem die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien noch etwas höher ausfällt als in 2012.

Die durch die Erneuerbaren Energien in ihrer Stromerzeugung substituierten Kraftwerke werden aus dem Counterfactual-Szenario abgeleitet. Die Emissionen im Counterfactual-Szenario werden durch die Definition zusätzlicher Kapazitäten beeinflusst. Diese zusätzlichen Kapazitäten laufen je nach unterstelltem Wirkungsgrad und der damit verbundenen Einordnung in die Merit-Order des Kraftwerkseinsatzes mit vergleichsweise hohen Auslastungen. Daher beeinflusst die Auswahl der zusätzlichen Kapazitäten, wenn auf Grund der gewählten Wirkungsgrade hohe Laufzeiten erreicht werden, auch die ermittelten Substitutionen.

Stehen diese Kraftwerke wie im Rahmen des Gutachtens angenommen in Deutschland verbleibt auch die damit verbundene Erzeugung in Deutschland. Die in Deutschland realisierte Vermeidung von Emissionen ist damit weiterhin relativ hoch. Dabei ist auch zu beachten, dass die angenommenen Brennstoffpreise und Preise für Emissionszertifikate im Szenario mit Einspeisung Erneuerbarer Energien und im Counterfactual-Szenario gleich sind.

Die Modellierung Deutschlands einschließlich der Nachbarländer erlaubt eine optimierte Ausnutzung der Interkonnektoren, die im Rahmen der nationalen Modellierung nicht zur Verfügung steht. Grundlage bei der nationalen Modellierung ist die Deckung der stündlichen Stromnachfrage (einschließlich der tatsächlichen Import-/Exportströme) durch nationale Kapazitäten. Bei der Modellierung unter Berücksichtigung der Nachbarländer muss dagegen zu jeder Zeit die stündliche Nachfrage

in jedem modellierten Land (ohne etwaige Import-/Exportströme) durch die national verfügbare Erzeugung bzw. durch die Nutzung der Interkonnektoren gedeckt werden. Die Stromflüsse über die Ländergrenzen hinweg ergeben sich dann als Ergebnis der Modellierung.

Vor diesem Hintergrund kann im Rahmen der EU-Modellierung mit einer geringeren zusätzlichen Kapazität gerechnet werden ohne das in einzelnen Stunden die Nachfrage nach Strom nicht durch ausreichende Erzeugungskapazität gedeckt werden kann. Daher wurde hier nur mit ca. 9 GW anstatt 13 GW gerechnet (siehe Tabelle 5).

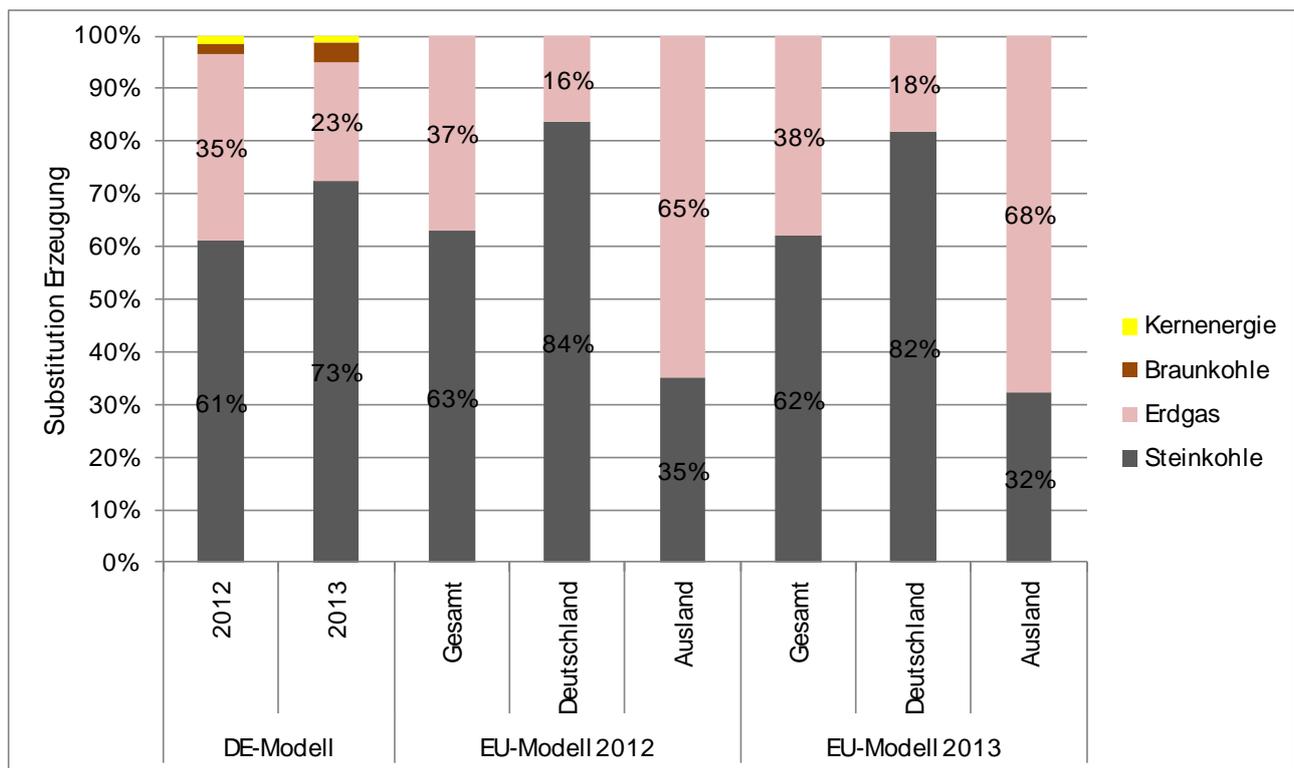
Tabelle 5: Vergleich der zusätzlichen Erzeugungskapazität im Counterfactualszenario in der nationalen (DE-Modell) und EU-weiten Modellierung (EU-Modell)

Kraftwerkstyp	Jahr	DE-Modell	EU-Modell	Wirkungsgrad
		Leistung in MW	Leistung in MW	
Steinkohle-Alt	2012/2013	3.500	2.800	35 %
Steinkohle	2012/2013	4.760	3.520	45 %
Gas-GuD-Alt	2012/2013	1.050	600	50 %
Gas-GuD	2012/2013	1.330	760	60 %
Gas-GT-Alt	2012/2013	1.050	600	30 %
Gas-GT	2012/2013	1.330	760	40 %
Gesamt		13.020	9.040	-

Quelle: eigene Annahmen, DE-Modell: ohne dynamische Modellierung Außenhandel, EU-Modell mit dynamischer Betrachtung Außenhandel

Die Modellergebnisse zeigen, dass bei einer rein nationalen Betrachtung es größere Kapazitätsengpässe gibt als dies in einer umfassenderen Betrachtung unter Einbeziehung der Nachbarländer der Fall ist. Auf Grund der dadurch zusätzlich definierten Kapazitäten im Counterfactualszenario von ca. 4 GW in der nationalen Modellierung und den Brennstoffpreisrahmenbedingungen werden in der nationalen Modellierung mehr Steinkohlekraftwerke verdrängt. Gleichzeitig sind dies auch Kraftwerke mit typischerweise hohen Effizienzen. Neben den Steinkohlekraftwerken betrifft die Verdrängung in Deutschland zum Teil auch bereits Kernkraftwerke, die im Rahmen der EU-Modellierung nicht im gleichen Umfang abgebildet werden können. Im Ergebnis zeigt sich, dass insbesondere für 2013 bei einer nationalen Betrachtung sowohl mehr als auch effizientere Steinkohlekraftwerke verdrängt werden (siehe Abbildung 19). Dies führt trotz einer verstärkten Verdrängung von Steinkohle bei einer nationalen Betrachtung auf Grund der Effizienz der verdrängten Kraftwerke zu niedrigeren Emissionen im Vergleich zu den Modellrechnungen, in denen die Nachbarländer mit betrachtet werden.

Abbildung 19: Vergleich der nationalen Modellierung (DE-Modell) mit den Verdrängungen in Deutschland und im Ausland in der EU-weiten Modellierung (EU-Modell)



Quelle: eigene Annahmen, DE-Modell: ohne dynamische Modellierung Außenhandel, EU-Modell mit dynamischer Betrachtung Außenhandel

Als Schlussfolgerung für die Bewertung der Emissionsminderungen im Vergleich zwischen einer rein nationalen Betrachtung und einer Betrachtung, die den Außenhandel mit einschließt, zeigen sich folgende zentralen Erkenntnisse:

- Betrachtung nur Deutschland
 - Zusammensetzung und Höhe der Kapazität im Counterfactual Szenario ist von großer Bedeutung für die Emissionen in Deutschland und damit auch für die Emissionsverminderungen
 - Größere Kapazitätsengpässe und damit verbunden größere zusätzliche Kapazitäten sind bei einer rein nationalen Betrachtung notwendig. Dies führt zu einer Verdrängung von effizienteren Kraftwerken als im zweiten Fall mit Berücksichtigung des Außenhandels.
 - Detaillierte Abbildung von Verdrängung auf Basis von Kernenergie und Braunkohle bei nationaler Betrachtung möglich, die bei Betrachtung mehrerer Länder nur mit großem Aufwand realisierbar.
- Betrachtung Europa
 - Modelltechnische Kalibrierung erfolgt auf Basis von Kernenergie und Braunkohle, Stromerzeugungskapazitäten auf Basis von Kernenergie und Braunkohle haben hohe Auslastung und können nicht nennenswert gesteigert werden, modelltechnische Abbildung einer Substitution nur mit großem Kalibrierungsaufwand möglich

- Emissionsminderungen in Europa abhängig von verfügbaren Erzeugungskapazitäten (in der Regel Steinkohle- bzw. Gaskraftwerke) in Deutschland (abhängig von Counterfactual-Szenario in Deutschland) bzw. im Ausland.
 - Basis für Kraftwerkseinsatz sind das aktuelle Preisniveau für CO₂ und Brennstoffe
 - Höhe der zusätzlichen Steinkohlekapazität in Deutschland ist entscheidend für die Höhe der vermiedenen Emissionen in Deutschland. Ansonsten wäre der Export größer und ein deutlich größerer Teil der vermiedenen Emissionen würden ins Ausland wandern.
 - Die Wirkung auf die Gesamtemissionen in Europa hängt von den „Reserven“ für weitere Auslastung insbesondere von bestehenden Steinkohlekraftwerken ab.

Eine modelltechnische Antwort auf die Frage, ob durch den Außenhandel der Betrieb von Grundlastkraftwerken auch bei hoher Einspeisung Erneuerbarer Energien ermöglicht wird, kann nicht direkt beantwortet werden, da die Erzeugung aus Grundlastkraftwerken auch als Kalibrierungsgröße genutzt wird. Die Analyse hat aber gezeigt, dass Grundlastkraftwerke in 2012 und 2013 vergleichsweise hoch ausgelastet waren. Eine weitere Steigerung der Stromerzeugung im Szenario ohne Einspeisung Erneuerbarer Energien wurde daher nicht unterstellt. Um darüber eine Aussage zu treffen, wäre für jedes Land zu ermitteln, welche Kapazitäten etwa aus Kernenergie in jeder Stunde tatsächlich zur Verfügung standen und nicht etwa auf Grund von Revisionen oder anderen Stillstandsgründen nicht verfügbar waren. Eine derartige Analyse ist bei einer rein nationalen Analyse für Deutschland in vorhergehenden Gutachten durchgeführt worden, konnte im Rahmen dieser Modellierung auf Grund der deutlich größeren Anzahl an Grundlastkraftwerken und einer begrenzten Verfügbarkeit an Daten nicht erfolgen.

Die Auswertung der zusätzlichen Exportströme in die Alpenländer Österreich und die Schweiz, die mit größeren Pump-Speicherkraftwerken ausgestattet sind, zeigt, dass in beide Länder ein größerer Exportstrom im Counterfactual-Szenario auftritt. Nach Österreich sind es mehr als 13 TWh und in die Schweiz mehr als 5 TWh. Gleichzeitig fallen die vermiedenen Emissionen in beiden Ländern im Vergleich zu den anderen Nachbarländern Deutschlands gering aus. In Österreich liegen die vermiedenen Emissionen bei ca. 3 Mio. t. In der Schweiz werden durch diesen Importstrom fast keine Emissionen vermieden. Gleichzeitig verändert sich allerdings auch der Exportfluss von der Schweiz nach Frankreich, so dass sich möglicherweise indirekte Emissionsminderungen in Frankreich ergeben können, die aus einem zusätzlichen Import aus der Schweiz nach Frankreich entstehen können.

5 Forschungsbedarf zur Abbildung der Substitutionswirkung Erneuerbarer Energien im EU-Strommarkt

Die Analysen und Modellergebnisse haben gezeigt, dass die Einspeisung Erneuerbarer Energien in Deutschland größere Auswirkungen auf die Nachbarländer von Deutschland hat. Knapp 60 % der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien haben zu einer Substitution der Stromerzeugung in Deutschland geführt. Die verbleibenden 40 % haben zu Emissionsminderungen im Ausland beigetragen. Dies gilt sowohl 2012 als auch 2013. Für die Bewertung der Emissionsminderung spielt insbesondere die zusätzlich definierte Kapazität im Counterfactual-Szenario eine große Rolle. Zukünftiger Forschungsbedarf besteht darin, wie diese Kapazität zu bestimmen ist und welche Zielvorstellung mit dem Counterfactual-Szenario verbunden ist.

Vorgehen zur Bestimmung des Counterfactual-Szenario

In den bisherigen Analysen und Gutachten basierte das Counterfactual-Szenario weitgehend auf dem bestehenden und historisch gewachsenen Kraftwerkspark. Auf Grund der zunehmenden Bedeutung und der größer werdenden Rolle Erneuerbarer Energien für das Stromsystem ist im Fall, dass die Erneuerbaren Erzeugungskapazitäten nicht zur Verfügung stehen, ein stärker generisch definiertes Alternativ-Szenario notwendig. Die Bestimmung dieses Alternativszenarios kann auf unterschiedliche Weise erfolgen und wird durch eine Ausweitung des Bilanzraums, der auch Deutschlands Nachbarländer mit umfasst, deutlich komplexer.

Bisher wird das Counterfactual-Szenario auf Basis der Substitutionswirkung vorgegeben. Dabei wird unterstellt, dass durch die Setzung bestimmter Kapazitäten die Erzeugung ohne Erneuerbare Energien im Counterfactual Szenario möglichst kostenoptimal ist. Anstatt einer generischen Setzung der Kapazitäten bieten sich hierfür Optimierungsmodelle an, die beispielsweise einen kostenoptimierten Kraftwerkspark bestimmen, der unter den aktuellen Rahmenbedingungen für das jeweilige Jahr die Stromnachfrage im Bilanzraum kostenoptimal deckt. Im Rahmen von Szenarioanalysen sollten unterschiedliche Ansätze für die Definition der zusätzlichen Kapazitäten als auch der möglichen Standorte untersucht werden.

Zukünftige Fortschreibung des Counterfactual-Szenarios

Als wichtige Fragestellung ist auch die weitere zukünftige Entwicklung zu betrachten, um eine Vergleichbarkeit der Analysen zukünftiger Jahre mit historischen Daten zu gewährleisten. Hierzu sollten Überlegungen eingehen, wie die Entwicklung des Counterfactual-Szenarios fortzuschreiben ist.

Detaillierte Analyse von Substitutionswirkungen bei Grundlastkraftwerken im Ausland

Das vorliegende Gutachten geht davon aus, dass in den Nachbarländern Deutschland bestehende Grundlastkraftwerke auf Basis von Kernenergie bzw. Braunkohle auch mit der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien unverändert betrieben werden. In den Analysen für Deutschland hat sich jedoch gezeigt, dass es auch hier einzelne Stunden geben kann, in denen verfügbare Kraftwerke nicht vollumfänglich eingesetzt werden. Zukünftig sollten bei einer Bewertung der Minderungswirkungen auch diese Kraftwerke detaillierter betrachtet werden. Für eine Einschätzung, ob Kraftwerke auf Grund einer Einspeisung aus Erneuerbaren Energien nicht betrieben worden sind (also strommarktbedingt) oder auf Grund von Ausfällen bzw. Wartungsarbeiten ist grundsätzlich auf Basis von öffentlich verfügbaren Informationen möglich. Hierfür ist jedoch die Auswertung von Kennzahlen zur Kraftwerksverfügbarkeit als auch detaillierte Angaben zu Kraftwerkswartungen notwendig. Dies bedingt jedoch einen größeren Kalibrierungsaufwand, da diese Kennzahlen für einzelne Kraftwerke ermittelt werden müssen.

Diskussion möglicher Ziele der Analyse

Ziel der Analyse war in der Vergangenheit, den Beitrag der Erneuerbaren Energien zur Emissionsreduzierung insgesamt zu bewerten, der u.a. als Rechtfertigung für eine Förderung Erneuerbarer Energien dient. Zum anderen soll durch die Analyse auch die spezifische Emissionsvermeidung, die durch Erneuerbare Energien im Stromsektor erreicht werden kann, bestimmt werden, um beispielsweise Fragen der Sektorkopplung und des höchsten spezifischen Beitrages der Erneuerbaren Energien zur CO₂-Vermeidung zu ermitteln.

Für die weitere Ausgestaltung der Energiewende und der langfristigen Ziele zur Treibhausgas-Minderung ist ein Verständnis der Minderungswirkungen der deutschen Einspeisung aus Erneuerbaren Energien im europäischen Strommarkt von besonderer Bedeutung. Existieren neben den europäischen Zielen auch nationale Ziele zur Treibhausgasminderung wirken sich nationale Maßnahmen wie der Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland nicht nur auf den deutschen Energiemarkt aus, sondern führen wie in der Studie gezeigt, auch zu Minderungswirkungen im benachbarten Ausland.

Für zukünftige Arbeiten ist daher ein verbessertes Verständnis notwendig, in welcher Weise der Ausbau Erneuerbarer Energien zum einen zu europäischen Treibhausgasminderungen beiträgt, aber auch zum anderen sich auf die nationale Treibhausgasbilanz auswirkt. Die aktuelle Diskussion um die Einhaltung des nationalen Klimaschutzziels und die Einführung einer Klimaabgabe zu Beginn des Jahres 2015 zeigen, dass hier größerer Forschungsbedarf besteht.

6 Quellenverzeichnis

- Klobasa, M., Sensfuß, F. (2015): CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2012 und 2013. Bericht für die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) im Auftrag des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Karlsruhe 2015.
- Roth, H.; Brückl, O.; Held, A. (2005): Windenergiebedingte CO₂-Emissionen konventioneller Kraftwerke. Wagner, U. (Hrsg.), München: Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
- Klobasa, M. (2007): Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Dissertation, Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule
- ÜNBs (2015): Netztransparenz.de Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber – Marktprämie, online unter <http://www.netztransparenz.de/de/Marktpr%C3%A4mie.htm> besucht am 30.10.2015
- BMRS (2015): Balancing mechanism reporting system, System Operation UK, http://www.bmreports.com/bwx_report-ing.htm
- Nordpool (2015): Nordpool spot, Historical market data, <http://www.nordpoolspot.com/historical-market-data/>
- RTE (2015): Power Generation by Energy Source, RTE, Réseau de transport d'électricité, online unter <http://www.rte-france.com/en/eco2mix/eco2mix-mix-energetique-en>
- Terna (2015): Forecast and actual generation of wind power, TERNA, Italien grid operator for transmission of electricity, <http://www.terna.it/SistemaElettrico/TransparencyReport/Generation/Forecastandactualgeneration.aspx>
- energinet.dk (2015): Production and consumption, MWh/h, Danish Transmission system operator, data online available unter <http://www.energinet.dk/EN/El/Engrosmarked/Udtraek-af-markedsdata/Sider/default.aspx>
- AGEE-Stat (2015): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, Arbeitsgemeinschaft Erneuerbaren Energien Statistik im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie online unter http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html besucht am 30.06.2015

