

Schlussbericht

Projekt "Future of Fossil Fuels in the wake of greenhouse gas neutrality" (FFF)

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Berlin

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin)

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Förderkennzeichen:

01LA1810A

01LA1810B

01LA1810C

Vorhabenbezeichnung:

Future of Fossil Fuels in the wake of greenhouse gas neutrality (FFF) - Die Zukunft fossiler Energieträger im Zuge von Treibhausgasneutralität (FFF)

Laufzeit des Vorhabens:

10/2018 – 09/2021

Autor*innen:

von Hirschhausen, Christian; Oei, Pao-Yu; Brauers, Hanna; Schill, Wolf-Peter; Pahle, Michael; Osorio, Sebastian

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhalt

1. Zielstellung des Verbundprojektes	3
2. Projektablauf.....	5
2.1. Arbeitspakete	5
2.1.1. Arbeitspaket 1: Problemdefinition und Entwicklung eines gemeinsamen Rahmens (TUB , PIK, DIW).....	5
2.1.2. Arbeitspaket 2: Umsetzung eines Ausstiegs aus fossilen Brennstoffen (TUB).....	6
2.1.3. Arbeitspaket 3: Interaktionen der europäischen Politik (PIK)	6
2.1.4. Arbeitspaket 4: Flexibilität und Sektorkopplung (DIW Berlin).....	7
2.1.5. Arbeitspaket 5: Einbeziehung von Interessengruppen und Verbreitung von Informationen (TUB , PIK, DIW).....	7
2.1.6. Arbeitspaket 6: Synthese und politische Empfehlungen (TUB, PIK, DIW).....	8
2.2. Liste der gemeinsamen Arbeitstreffen.....	8
3. Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	9
4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
5. Ergebnisse des Projektes.....	12
5.1. AP1: Problemdefinition und Entwicklung eines gemeinsamen Rahmens.....	12
5.2. AP2: Umsetzung eines Ausstiegs aus fossilen Brennstoffen	13
5.3. AP3: Interaktionen der europäischen Politik.....	18
5.4. AP4: Flexibilität und Sektorkopplung.....	24
5.5. AP5: Einbeziehung von Interessengruppen und Verbreitung von Informationen.....	28
5.6. AP6: Synthese und politische Empfehlungen	34
6. Ausgabenübersicht.....	36
6.1. Technische Universität Berlin	36
6.2. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung	36
6.3. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	37
7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	37
7.1. Technische Universität Berlin	37
7.2. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	37
7.3. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung	38
8. Nutzen der Projektergebnisse.....	39
9. Veröffentlichung der Ergebnisse.....	40
9.1. 2019	40

9.2.	2020	40
9.3.	2021	41
9.4.	2022	41
9.5.	Im Veröffentlichungsprozess bzw. noch unveröffentlicht.....	42

1. Zielstellung des Verbundprojektes

Ziel dieses Vorhabens war es, bisher zu wenig erforschte Aspekte der Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors im europäischen Kontext zu untersuchen und konkrete politische Instrumente sowohl auf deutscher als auch auf europäischer Ebene zu bewerten. Dies bezieht sich insbesondere auf Kohle, aber auch auf andere fossile Brennstoffe, insbesondere Erdgas. Durch verschiedene trans- und interdisziplinäre Forschungsaspekte kann es gelingen die verschiedenen ökonomischen und technischen als auch sozialen und politischen Herausforderungen des anstehenden Ausstiegs aus den fossilen Energieträgern besser zu verstehen. Die Innovation des Forschungsansatzes besteht in der Zusammenführung von methodischen Ansätzen der Forschung (numerische Modellierung, Theorie, Ökonometrie, Institutionenökonomik/politische Ökonomik) mit praktischen Fragen der politischen Ausgestaltung unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Praxispartnern mit einem Fokus auf nationalem Niveau und der europäischen Ebene.

Verschiedene aktuelle Szenarien zeigen, dass ein weltweiter Ausstieg aus der Kohle in den nächsten Jahrzehnten der Schlüssel zum Erreichen von Treibhausgasneutralität ist. Dies bedeutet, dass bestehende Bergwerke und Kraftwerke teils lange vor dem Ende ihrer erwarteten technischen Lebensdauer stillgelegt werden müssen. Gleichzeitig ist eine rasche Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der internationalen Klimaziele, da die Emissionsminderung in anderen Sektoren schwieriger zu bewerkstelligen ist und möglicherweise längere Umstellungszeiten erfordert. Darüber hinaus ermöglicht sie eine tiefgreifende Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Mobilität durch Elektrifizierung (Sektorenkopplung).

Die Europäische Union (EU), die alle ihre Mitgliedsstaaten durch ein gemeinsames NDC (Nationally Determined Contributions; „national festgelegte Beiträge“) international vertritt, ist in dieser Hinsicht ein sehr wichtiger Akteur. Sie ist einer der Hauptbefürworter des 2-Grad-Ziels und strebt danach, Vorreiter und positives Beispiel für alle anderen Länder zu sein. In Bezug auf den Kohleausstieg hat sich die vorherrschende Frage in der EU in den letzten zehn Jahren von "ob?" zu "wann?" und "wie?" verschoben. Dagegen scheint die Rolle von Erdgas und Erdöl als Energieträger noch offener zu sein. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die EU eine führende Rolle bei einem umfassenden Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe anstrebt, was die Bewältigung mehrerer Herausforderungen erfordert. Die Verflechtung zwischen EU- und nationalen Maßnahmen ist insbesondere im Elektrizitätssektor zu berücksichtigen, da dieser die Grundlage für die künftige Integration mit Sektoren wie der Wärmeversorgung von Haushalten und Industrie sowie dem Verkehr bildet. Aspekte der Kopplung dieser Sektoren und der verstärkten Interaktion mit dem Elektrizitätssektor wurden aus einer Top-down-Perspektive mit einem Energiesystemmodell analysiert, das durch detaillierte Analysen ergänzt wurde, insbesondere die Interaktion des Elektrizitätssektors mit dem Verkehr, den Industriesektoren des europäischen Emissionshandelsystems, den Wärme- und Kälteanwendungen sowie den Anwendungen von Technologien, die Biomasse und Kohlenstoffabscheidung, -transport und -lagerung (CCTS) nutzen. Andere, stärker

sektorbezogene Modelle müssen heutzutage auch die Sektorkopplung berücksichtigen, hauptsächlich mit dem Stromsektor und anderen Sektoren. In diesem Zusammenhang werden Fragen der Energiesicherheit, der Flexibilität des Stromsystems sowie des ausreichenden Einsatzes und der Marktintegration erneuerbarer Erzeuger noch wichtiger, wenn die Gesamtstromnachfrage im Rahmen von Sektorkopplungsmaßnahmen steigt.

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel dieses Projekts, die wesentlichen Aspekte der Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors im europäischen Kontext zu untersuchen und eine Bewertung konkreter Politikinstrumente für beide Ebenen abzuleiten. Wir erweiterten bestehende Analysen, die sich auf die Reduktion der Kohleverstromung konzentrieren, indem wir alle fossilen Brennstoffe, insbesondere Erdgas, berücksichtigen. Während wir den Klimaschutzplan 2050 in Deutschland als wichtigen Referenzpunkt nehmen, betrachten wir auch die europäische Ebene, wie oben erläutert. Wir ziehen Lehren aus der Dekarbonisierung in anderen wichtigen EU-Ländern, wie dem Vereinigten Königreich, oder Polen.

Kurz gesagt, die wichtigsten Forschungsfragen in diesem Projekt waren:

- Was sind die wichtigsten wirtschaftlichen und technischen sowie sozialen und politischen Triebkräfte und Hürden für einen europäischen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen bis 2050? Erlaubt das verbleibende CO₂-Budget Erdgas als "Brückentechnologie" oder wäre eine direkte Umstellung von Kohle auf erneuerbare Energiequellen vorzuziehen? Wird die CO₂-Abscheidung mit oder ohne die Kombination von Biomasseanlagen eine Rolle spielen und diesen Umwandlungsprozess beeinflussen? Welche Pfade würden zu "stranded assets" führen, und welche Maßnahmen könnten ergriffen werden, um diese zu vermeiden? Wie wirkt sich ein Ausstieg aus fossilen Brennstoffen auf die Versorgungssicherheit und den Bedarf an zusätzlicher Netzinfrastruktur aus?
- Wie interagieren nationale Pfade für den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen mit der europäischen Klimapolitik, zu der unter anderem das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS), ein CO₂-Untergrenzenpreis, Emissionsminderungsstandards (EPS), ein Gesetz zum Ausstieg aus Kohle (und Erdgas) und brennstoffspezifische Kapazitätsinstrumente gehören? Wie lässt sich eine Verlagerung der Treibhausgasemissionen innerhalb der EU vermeiden? Wie können die Herausforderungen der Priorisierung wirtschaftlicher Ziele zwischen der nationalen und der EU-Ebene im Lichte der Föderalismusatheorien und des institutionellen Wettbewerbs zwischen zentraleren und dezentraleren Lösungen neu gelöst werden?
- Welche Auswirkungen hat der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe und die entsprechend deutlich verstärkte Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energien auf die Nachfrage nach und die Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem? Welche Interaktionen ergeben sich dabei insbesondere mit einer stärkeren Sektorenkopplung? In diesem Zusammenhang gewinnen auch die sozioökonomischen Auswirkungen zusätzlicher Infrastrukturen zur Nutzung erneuerbarer Energien und zur Bereitstellung von Flexibilität an Bedeutung.

2. Projektablauf

Der folgende Abschnitt beschreibt den zeitlichen und inhaltlichen Verlauf des Projektes. In Abschnitt 5 werden die konkreten Projektergebnisse der Arbeitspakete behandelt.

2.1. Arbeitspakete

2.1.1. Arbeitspaket 1: Problemdefinition und Entwicklung eines gemeinsamen Rahmens (**TUB, PIK, DIW**)

In Arbeitspaket 1 wurde zunächst durch alle Projektpartner gemeinsam die bestehende Forschung in Bezug auf Literatur und Szenarien, die für die Arbeitspakete 2, 3 und 4 relevant sind, kurz überprüft und zusammengefasst. Der Schwerpunkt lag auf einer Verbesserung des Verständnisses der jüngsten Entwicklungen in der Literatur und der politischen Entwicklungen. Es wurden die Entwicklungen im Energiesektor und die Verflechtungen mit anderen Sektoren unter dem Aspekt eines Emissionsziels betrachtet. Der aktuelle Stand verschiedener wirtschaftlicher, technischer, sozialer und politischer Aspekte und deren Abhängigkeiten wurden herausgearbeitet.

Das Arbeitspaket spezifiziert auch Datenschnittstellen und koordiniert die Modellierungsaktivitäten zwischen den Arbeitspaketen 2, 3 und 4. Die Szenariendefinition griff insbesondere auf die Ergebnisse des BMBF-Kopernikus-Projekt ENavi zurück. Dieser Prozess wurde vom PIK koordiniert, das den Informationsfluss von ENavi zu FFF ermöglichte und Synergien zwischen den Projekten sicherstellte. Die Kerndimension dieser Szenarien ist die Frage, wie sich die klimapolitischen Ambitionen und die Stringenz in Deutschland mit den Ambitionen und Plänen im übrigen Europa mit Fokus auf fossile Brennstoffe und den Stromsektor decken.

Vier Modellrahmen mit komplementären Stärken wurden verwendet, was ein wesentlicher Mehrwert dieses Projekts ist: Für die Top-down-Modellierung verwendeten wir das GENeSYS-Modell, ein Energiesystemmodell. Das langfristige dynamische europäische Energiesystemmodell dynELMOD ermöglichte explizite Untersuchungen von Pfadabhängigkeiten, Netzauswirkungen und gestrandeten Vermögenswerten. Das LIMES-EU-Modell konzentrierte sich auf die Darstellung politischer Instrumente, insbesondere auf die Interaktion mit dem EU-Emissionshandelssystem. Der DIETER-Rahmen wurde verwendet, um Aspekte der Flexibilität des Stromsystems und der Sektorkopplung genauer zu untersuchen. Mehrere der im Projekt entwickelten und verwendeten Modellcodes wurden kostenlos unter offenen Lizenzen zur Verfügung gestellt.

2.1.2. Arbeitspaket 2: Umsetzung eines Ausstiegs aus fossilen Brennstoffen (TUB)

Arbeitspaket 2 führte sowohl eine quantitative als auch eine qualitative länderübergreifende Analyse potenzieller Pfade für den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen in Deutschland und in einigen anderen ausgewählten europäischen Ländern durch. Die Analyse der politischen Ökonomie untersucht verschiedene kohlenstoffarme Strategien in verschiedenen europäischen Ländern. So wurde beispielsweise analysiert, warum einige Länder in der Lage zu sein scheinen, einen konsequenten Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu verfolgen, während andere weiterhin in Technologien investieren, die Kohle und Erdgas nutzen. Hierfür wurden in enger Interdependenz mit Arbeitspaket 5 Stakeholder-Engagement genutzt, um sowohl praktische Beratung und Überprüfung der theoretischen Arbeit zu generieren. Die qualitativen Ergebnisse wurden aufgegriffen und als Input für die quantitative Modellierung in den zwei Modellen GENeSYS-MOD und dynELMOD verwendet.

Um die Transformationspfade so konkret wie möglich umzusetzen, wurden auch lokale Erzeugungspotenziale, Speichertechnologien und der Bedarf an grenzüberschreitender Übertragungskapazität berücksichtigt. In verschiedenen Szenarien wird dabei die Bedeutung der CCTS-Technologie für fossile und Biomasse-Anlagen sowie der Einfluss anderer negativer Emissionstechnologien auf die Zukunft für fossile Brennstoffe bewertet. Die quantitativen Ergebnisse sind in die qualitative Validierung des Ausstiegs aus der Nutzung fossiler Brennstoffe eingeflossen, und gemeinsam wurden so die Anwendbarkeit und die Wege für eine tiefgreifende Dekarbonisierung in Europa untersucht.

2.1.3. Arbeitspaket 3: Interaktionen der europäischen Politik (PIK)

In Arbeitspaket 3 wurden sowohl eine konzeptionelle als auch eine modellbasierte Analyse durchgeführt. Der konzeptionelle und theoretische Rahmen analysiert die politischen Wechselwirkungen zwischen der nationalen und der EU-Ebene. Obwohl gezielte Maßnahmen zum Ausstieg aus fossilen Brennstoffen bisher auf nationaler Ebene durchgeführt wurden, stellt das Papier diese ersten Beobachtungen auf eine solidere empirische Grundlage, einschließlich einer Klärung der politischen Beweggründe. Wir wenden unseren Rahmen auf den deutschen Kohleausstieg an und zeigen die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen auf, da sich überschneidende Politiken in Gegenwart des EU-Emissionshandelssystems nach hinten losgehen könnten.

Die modellbasierte Analyse konzentrierte sich zunächst auf die Erweiterung und Verbesserung des Modells LIMES-EU. Dabei handelt es sich um ein langfristiges Investitionsmodell für den Elektrizitätssektor, das so erweitert wurde, dass es das gesamte EU-EHS abdeckt. Dies bedeutete die Einbeziehung des energieintensiven Sektors und der Fernwärme, um das gesamte EU-EHS zu erfassen, die detailliertere Darstellung des EU-EHS durch Einbeziehung der Marktstabilitätsreserve (MSR), die Einbeziehung negativer Emissionstechnologien

(insbesondere Biomasse in Verbindung mit CCS - BECCS), die Aktualisierung verschiedener Parameter und Annahmen (z. B. Brennstoffkosten, CAPEX, Emissionsobergrenze) und die Einbeziehung nationaler Politiken (z. B. Pläne für den Kohleausstieg in verschiedenen Mitgliedstaaten). Auf der Grundlage dieses Modells haben wir verschiedene Analysen entwickelt, die sich auf die durchgeführten oder geplanten Reformen des EU-Emissionshandelssystems und ihre Wechselwirkung mit nationalen Maßnahmen konzentrieren.

2.1.4. Arbeitspaket 4: Flexibilität und Sektorkopplung (DIW Berlin)

Im Stromsektor impliziert der Ausstieg aus fossilen Energieträgern eine sehr starke Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energien, insbesondere der Windkraft und der Photovoltaik. Die Integration dieser Technologien in das Energiesystem steigert die Nachfrage nach zeitlicher Flexibilität im Gesamtsystem erheblich. Im Arbeitspaket 4 standen daher verschiedene Optionen für die Bereitstellung dieser Flexibilität sowie ihr Zusammenspiel mit verschiedenen Technologien der Sektorenkopplung im Fokus.

Die Arbeiten wurden in drei verschiedene Tasks gegliedert. In Task 4.1 wurden übergeordnete bzw. theoretische Analysen zu Flexibilitätsaspekten fluktuierender erneuerbarer Energien und der Sektorenkopplung im Kontext eines Fossil-Fuel-Phase-Outs vorgenommen. In Task 4.2 wurden quantitative, numerische Analysen zu dieser Thematik durchgeführt. Task 4.3 umfasste komplementäre empirische Arbeiten zu den sozioökonomischen Implikationen von Infrastrukturen der erneuerbaren Stromerzeugung (Bioenergie) bzw. der Bereitstellung von Flexibilität (Stromübertragungsnetze).

Methodisch war insbesondere für Task 4.2, aber auch für stilisierte Illustrationen in Task 4.1, zunächst eine Weiterentwicklung des quelloffenen Stromsektormodells DIETER erforderlich. Verschiedene Modellversionen wurden dann auf spezifische Fragestellungen parametrisiert, numerisch gelöst und in Form von Fachartikeln verschriftlicht. Weitere Details hierzu enthält Abschnitt 5.4. Für die empirischen Arbeiten in Task 4.3 waren zunächst recht umfangreiche Datenarbeiten erforderlich, gefolgt von panelökonometrischen Analysen und wiederum einer Verschriftlichung in Form von Fachartikeln.

2.1.5. Arbeitspaket 5: Einbeziehung von Interessengruppen und Verbreitung von Informationen (TUB, PIK, DIW)

Arbeitspaket 5 bindet während des gesamten Forschungsprojekts kontinuierlich nationale und internationale Interessengruppen ein. In der Anfangsphase lag der Schwerpunkt auf der Problemdefinition im Rahmen des Arbeitspakets 1. Das Stakeholderengagement wurde also insbesondere genutzt um den aktuellen Stand verschiedener wirtschaftlicher, technischer, sozialer und politischer Aspekte der Dekarbonisierung und deren Abhängigkeiten

herauszuarbeiten. Im weiteren Verlauf fand ein regelmäßiger Austausch mit relevanten Stakeholdern in Deutschland und Europa statt. Workshops und Expert*inneninterviews mit Stakeholdern wurden genutzt, um die Ergebnisse von entworfenen Rahmes für einen fossilen Ausstieg in Europa zu bewerten. An den Workshops nahmen und Interviews nahmen Expert*innen aus Wissenschaft, Politik, Zivilgesellschaft und Praxis teil. Zudem wurden die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 2, 3, und 4 so fortlaufend über Workshops und Veranstaltungsteilnahmen disseminiert. Zum Ende des Projekts verlagerte sich der Schwerpunkt auf die Identifizierung von Politikempfehlungen für Arbeitspaket 6.

Im Laufe des Projekts nahmen alle Partnerinstitutionen an den "Begleitmaßnahmen" der Ökonomie des Klimawandels teil. Außerdem wurden Forschungsergebnisse der TU Berlin insbesondere in der europäischen und internationalen Gemeinschaft der Strommodellierung präsentiert und Szenarien und Ergebnisse auf Konferenzen wie der International Energy Economics (IAEE) und Resource and Environmental Economics (EAERE) vorgestellt. Das PIK brachte seine nordamerikanischen Kontakte wie Resources for the Future (RFF) und die University of California ein, während das DIW mehrere Forschungsprofessoren als Gesprächspartner nutzte (CIDE Mexiko, University of Maryland). Eine Abschlusskonferenz ermöglichte weiteren Austausch mit den Akteuren und die Verbreitung der Projektergebnisse. Eine Projektbroschüre mit den wichtigsten Endergebnissen erhöhte weiterhin die Sichtbarkeit der Ergebnisse bei Akteuren aus Wissenschaft, Praxis, Politik, Gewerkschaften und Zivilgesellschaft. Zwischenergebnisse wurden außerdem öffentlich in diversen Zeitungsartikeln bzw. Interviews erwähnt. Ein aktiver Austausch mit anderen BMBF Projekten findet insbesondere mit PEGAOS, ROCHADE und FoReSee statt.

2.1.6. Arbeitspaket 6: Synthese und politische Empfehlungen (TUB, PIK, **DIW**)

Ziel des Arbeitspakets 6 war die Synthese politikrelevanter Projektergebnisse der Arbeitspakete 2, 3 und 4. Dabei war bereits im Projektantrag eine Schnittmenge mit den Aktivitäten in Arbeitspaket 5 vorgesehen. Im Projektablauf stellte es sich dann zur Vermeidung von Dopplungen als effizient dar, AP 6 als eine Art virtuelles Arbeitspaket zu betrachten, bzw. als Bestandteil von AP 5. Dementsprechend wird hier auch auf die Inhalte des AP 5 verwiesen.

2.2. Liste der gemeinsamen Arbeitstreffen

Die folgenden eintägigen Projekttreffen wurden veranstaltet. Dabei waren jeweils alle Konsortialpartner vertreten. Der Projektträger war dabei jeweils eingeladen.

- 28. Januar 2019: Kick-Off
- 13. Dezember 2019: Internes Projekttreffen

- 02. Dezember 2020: Projekttreffen Präsentation der Zwischenergebnisse und zur Abstimmung des Projektabschlusses und Vorbereitung des Abschlussworkshops
- 29. September 2021: Abschlussworkshop (Online Event)
https://www.diw.de/de/diw_01.c.825543.de/veranstaltungen/abschlussworkshop_bmf-forschungsprojekt_fossil_fuels_in_the_wake_of_greenhouse_gas_neutrality_fff.html

Zusätzliche fanden regelmäßig Telefonkonferenzen der Projektpartner statt.

Darüber hinaus beteiligt sich das gesamte Konsortium aktiv bei allen Begleitmaßnahmen wie den Klimaforen, Roundtables, PhD Seminaren sowie dem Fachworkshop am 19. und 20.02.2020 an der TU Berlin.

Die Zusammenarbeit innerhalb des Verbundes war von sehr hoher Qualität. Dies zeigte sich nicht nur am regelmäßigen inhaltlichen Austausch, sondern auch an den gemeinsam durchgeführten Veranstaltungen. So wurden beispielsweise beim thematisch fokussierten Online-Workshop am 9.10.2020 speicherrelevante Forschungsergebnisse aus allen APs verglichen und von Mitarbeiter*innen aller APs diskutiert.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Forschungsvorhaben adressiert Forschungslücken, welche in den qualitativen und modellbasierten Analysen für Klimaschutz und die Transformation des Energiesystems identifiziert wurden. Teilaspekte der Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors im europäischen Kontext wurden tiefgehend untersucht, auch um konkrete politische Instrumente sowohl auf deutscher als auch auf europäischer Ebene zu bewerten. Insbesondere für Kohle und Erdgas müssen derzeit neue Lösungsansätze gefunden werden, um die Ausstiegsprozesse zu beschleunigen und mit struktur- und energiepolitischen Maßnahmen zu flankieren, um soziale Gerechtigkeit und Energiesicherheit zu gewährleisten. Die Innovation des Forschungsansatzes besteht in der Zusammenführung von methodischen Ansätzen der Forschung (numerische Modellierung, Theorie, Ökonometrie, Institutionenökonomik/politische Ökonomik) mit praktischen Fragen der politischen Ausgestaltung mit einem Fokus auf nationalem Niveau und der europäischen Ebene.

Es fehlten bislang mehr wissenschaftliche Fallstudien zu einzelnen Ländern, um vergleichen zu können warum einige den Ausstieg aus fossilen Energieträgern vorantreiben, während andere weitere Investitionen tätigen. Zudem war insbesondere unklar, in welchem Ausmaß die fossile Energieinfrastruktur in Europa von sogenanntem „asset stranding“ betroffen ist.

In diesem Forschungsvorhaben wurden, neben einer allgemeinen Betrachtung insbesondere: (1) die Treiber und Hürden für die Umsetzung des europäischen Ausstiegs aus der fossilen Stromerzeugung bis 2050, (2) die Frage, wie nationale Strategien mit der europäischen Klimapolitik zusammenwirken, und (3) die Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem

Ausstieg aus der fossilen Stromerzeugung, Flexibilitätsanforderungen, sowie weiteren Implikationen einer zunehmenden Sektorenkopplung untersucht.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zu den Projektworkshops wurden externe Expert*innen als Referent*innen und als Gäste eingeladen, vgl. Abschnitt 5.5. Zudem fand ein enger Austausch bei allen Begleitmaßnahmen statt.

5. Ergebnisse des Projektes

5.1. AP1: Problemdefinition und Entwicklung eines gemeinsamen Rahmens

Motivation

Diese Aufgabe zielt darauf ab, gemeinsame Elemente für die im Rahmen des Projekts bewerteten Szenarien zu definieren. Aufgrund des dynamischen politischen Rahmens in den letzten fünf Jahren und der unterschiedlichen Zeitplanung der einzelnen Arbeitspakete ist es nicht möglich, verbindliche gemeinsame Szenarien für alle Arbeitspakete zu erstellen. Dieses Dokument stellt jedoch sicher, dass sie einem roten Faden folgen, nämlich wie die klimapolitischen Ambitionen und die Stringenz in Deutschland mit den Ambitionen und Plänen im übrigen Europa mit Schwerpunkt auf dem Ausstieg aus fossilen Brennstoffen und dem Energiesektor übereinstimmen.

Methodik

Diese Aufgabe beruhte hauptsächlich auf einer Überprüfung der Szenarien. Angesichts unserer früheren Erfahrungen mit dem im BMBF-Kopernikus-Projekt ENavi initiierten Szenarienprozess stützen wir uns auf diese sowie auf die in Bartholdsen et al. (2019) vorgestellten Szenarien. In Anbetracht der sich stark verändernden politischen Landschaft (z. B. wurden die EU-Ziele nach oben korrigiert, indem zunächst die Notwendigkeit festgestellt wurde, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, und dann ehrgeizigere Ziele für 2030 definiert wurden) und der zeitlichen Abfolge der Projektaufgaben erstellen wir nicht formell verbindliche Szenarien für alle Arbeitspakete. Wir formulieren stattdessen einen allgemeineren Rahmen, der nicht nur gemeinsame Elemente in den Modellen, sondern auch die wichtigsten technisch-wirtschaftlichen und regulatorischen Faktoren umfasst. Außerdem bilden wir die vier im Projekt verwendeten Modelle ab. Dies ermöglicht schließlich eine umfassendere Vorstellung von den Komplementaritäten und Stärken der Modelle sowie die Ermittlung der wichtigsten Elemente, auf die sich die Modellierung konzentrieren sollte.

Ergebnisse/Schlussfolgerung

Ein Internes Papier (<https://www.pik-potsdam.de/members/osorio/internal-paper-fff-task-1.2/view>) zur Szenarienbeschreibung wurde an die drei Projektteams verteilt und von ihnen diskutiert. Der Szenariorahmen definiert vier Elemente, um die herum Szenarien im Projekt aufgebaut werden sollten. Diese sind:

- Klimapolitik: Die Szenarien sollten eine erhöhte Ambition widerspiegeln und insbesondere die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit der langfristigen Klimaneutralität bewerten.

- Globale Märkte: Die Szenarien sollten alternative externe Faktoren berücksichtigen, vor allem solche, die sich aus der Klimapolitik und der Marktdynamik ergeben.
- Fossil basierte Erzeugung: Ein Kernelement der Szenarien sollte die Bewertung der Zukunft der fossilen Stromerzeugung sein, insbesondere der Rolle von Erdgas (Übergangsenergieträger?), der voraussichtlichen Investitionsdynamik und der sie beeinflussenden Faktoren (z. B. Kurzsichtigkeit) sowie der Ausstiegsstrategien (ordnungspolitischer oder marktgesteuerter Ausstieg).
- Flexibilitätsoptionen: Um den Ausstieg aus den Kraftstoffen bewerten zu können, müssen die Flexibilitätsoptionen korrekt dargestellt werden. Unterschiedliche Politiken können dazu führen, dass bestimmte dieser Technologien (z. B. Power-to-Gas-Technologien) oder Maßnahmen (Anreize für Prosumierung) verstärkt werden.

Da der Detaillierungsgrad der Modelle sehr unterschiedlich ist, konnten nicht alle oben genannten Elemente in allen Modellen ausreichend detailliert dargestellt werden. Die Identifizierung ihrer Merkmale und der sich daraus ergebenden Komplementarität war jedoch nur durch die Verwendung der vier im Projekt verwendeten Modelle möglich. Für die Top-down-Modellierung verwenden wir das GENeSYS-Modell, ein Energiesystemmodell. Das langfristige dynamische europäische Energiesystemmodell dynELMOD ermöglicht explizite Untersuchungen von Pfadabhängigkeiten, Netzauswirkungen und gestrandeten Vermögenswerten. Das LIMES-EU-Modell konzentriert sich auf die Darstellung nationaler politischer Instrumente, insbesondere auf die Interaktion mit dem EU-EHS. Der DIETER-Rahmen wird verwendet, um Aspekte der Flexibilität des Stromsystems und der Sektorkopplung genauer zu untersuchen. Der Schwerpunkt dieser Modelle liegt auf dem Stromsektor. Die Modelle weisen jedoch Merkmale auf, die Überschneidungen begrenzen. Nicht nur der geografische und sektorale Umfang variiert, sondern auch die Granularität der Zeitelemente.

5.2. AP2: Umsetzung eines Ausstiegs aus fossilen Brennstoffen

Motivation

Innerhalb der EU sind Mitgliedsstaaten sehr unterschiedlich weit, wenn es um den Ausstieg aus Kohle und Erdgas geht. Um durchsetzungsfähige ‚low-carbon‘ Strategien für verschiedene europäische Länder zu entwickeln ist es wichtig die historischen Entwicklungen bei fossiler Energienutzung besser zu verstehen, um Faktoren zu identifizieren, die den Ausstieg aus der Nutzung begünstigen oder bremsen. Zudem ist es wichtig einen gesamteuropäischen Blick dafür zu behalten, ob Klimaschutzziele mit den geplanten Maßnahmen eingehalten werden können und welche Risiken weitere Investitionen in fossile Infrastruktur bieten, beispielsweise die sogenannten „stranded assets“.

Methodik

Arbeitspaket 2 nutzt insbesondere politökonomischen Analysen um historische Entwicklungen bei fossiler Energienutzung zu untersuchen. Dabei wurden insbesondere der Triple Embeddedness Framework (Geels 2014) und ein meta-theoretischer Energietransitions-Framework (Cherp et al. 2018) verwendet. Die Ergebnisse flossen dann in die quantitative Modellierung mit dem Energiesystemmodell Global Energy System Model (GENeSYS-MOD) und dem europäischen Stromsektormodell dynELMOD. Diese wurden durch einen soft-Link gekoppelt und ermöglichten es ‚low-carbon‘ Strategien für verschiedene europäische Länder zu entwickeln.

Ergebnisse/Schlussfolgerung

Drei Paper, die sich auf den qualitativen politökonomischen Analysen fokussieren, wurden in Zeitschriften mit peer-review veröffentlicht. Ein Paper vergleicht die Entwicklungen in Deutschland und Großbritannien mit einem Fokus auf die Entscheidungen für Kohle, eingebettet in andere Energiewende Strategien und dabei insbesondere Erdgas:

Brauers, Hanna, Pao Yu Oei, and Paula Walk. 2020. 'Comparing Coal Phase-out Pathways: The United Kingdom's and Germany's Diverging Transitions'. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 37 (December): 238-53. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.09.001>.

Politische Entscheidungen und Trends in Bezug auf den Einsatz von Kohle zur Stromerzeugung haben sich in Großbritannien und Deutschland unterschiedlich entwickelt, obwohl sie relativ ähnlichen Klimaschutzziele und allgemeinen politischen und wirtschaftlichen Bedingungen unterliegen. Das Vereinigte Königreich hat sich auf einen Kohleausstieg bis 2024 geeinigt. In Deutschland sieht ein Gesetz den Kohleausstieg bis spätestens 2038 vor. Das Papier untersucht die Gründe für die unterschiedlichen Entwicklungen und ermittelt die Haupthindernisse und Treiber für den Kohleausstieg. Der vergleichende Fallstudienansatz zeigt, dass die politischen Ergebnisse in Bezug auf den Kohleverbrauch von mehreren Akteursgruppen beeinflusst werden, nämlich von Kohleunternehmen, Gewerkschaften, Umwelt NGOs und die Regierung. Die am meisten diskutierten Aspekte eines Kohleausstiegs in beiden Ländern sind Bedenken hinsichtlich der Energiesicherheit, die Frage, ob Kohle im Inland abgebaut wird, die (regionale) wirtschaftliche Abhängigkeit, sowie die relative Macht der Akteure, die ein Interesse am Kohleverbrauch haben.

Ein weiteres Paper hat einen Fokus auf die Nutzung und politische Entscheidungen in Bezug auf einen möglichen Kohleausstieg in Polen.

Brauers, Hanna, and Pao Yu Oei. 2020. 'The Political Economy of Coal in Poland: Drivers and Barriers for a Shift Away from Fossil Fuels'. *Energy Policy* 144 (September): 111621. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111621>.

Polen ist der größte Steinkohle- und der zweitgrößte Braunkohleproduzent in der EU und erzeugt rund 80 Prozent seines Stroms aus Kohle. Der Widerstand gegen eine Reduzierung der Kohleproduktion und des Kohleverbrauchs kommt von verschiedenen Akteuren, nämlich

insbesondere Kohlekonzerne, Gewerkschaften, Teile der Zivilgesellschaft und die Regierung - sowie deren Koalitionen. Ihr Widerstand entsteht insbesondere durch die Sorge ihr Unternehmensgeschäft zu verlieren, durch negative Erfahrungen mit dem Strukturwandel in der Vergangenheit, Ängste vor steigenden Energiepreisen und Sorgen um die Energiesicherheit sowie potenzielle Arbeitslosigkeit in Regionen, die fast vollständig von der Kohle abhängig sind. In diesem Papier werden die wichtigsten politischen und wirtschaftlichen Treiber und Hindernisse für eine Verringerung der Kohleproduktion und des Kohleverbrauchs in Polen ermittelt. Unwirtschaftlicher Kohleabbau, unvermeidbare Energieinfrastrukturinvestitionen, steigende Luftverschmutzung und Druck von Seiten der Europäischen Union könnten neue politische Impulse für eine Abkehr von der Kohle im Einklang mit den internationalen Klimazielen geben. Allerdings zeigen die Ergebnisse jedoch, dass politische Maßnahmen, die auf eine Verringerung der Kohleproduktion und -nutzung abzielen, gemeinsam mit sozial- und strukturpolitischen Maßnahmen umgesetzt werden müssen, um politisch durchsetzbar zu sein. Diese können einen gerechten Übergang für die betroffenen Regionen im Einklang mit der Vision eines "European Green Deal" bieten.

Das dritte Papier untersucht mögliche Erdgasinfrastrukturinvestitionen in Deutschland:

Brauers, Hanna, Isabell Braunger, and Jessica Jewell. 2021. 'Liquefied Natural Gas Expansion Plans in Germany: The Risk of Gas Lock-in under Energy Transitions'. *Energy Research & Social Science* 76 (June): 102059. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102059>.

Die deutsche Energiewende wird oft als Vorbild für den Klimaschutz gepriesen. Doch die Pläne für den Bau von drei großen Flüssiggas-Importterminals (LNG) werden von staatlicher Seite stark gefördert. Dies steht im Widerspruch zu den deutschen Klimazielen, die eher eine Reduzierung als eine Ausweitung des Erdgasverbrauchs fordern. In unserem Papier zeigen wir den Zusammenhang zwischen dem Risiko der Erdgasbindung und der Energiewende auf. Wir analysieren die Ko-Evolution der technisch-ökonomischen, sozio-technischen und politischen Bereiche des deutschen Erdgassektors und den Einfluss der Akteure innerhalb dieses Prozesses. Wir verwenden eine Kombination aus Energiesystem und Interviewdaten und führen einen neuen Ansatz zur Triangulation von Material- und Akteursanalyse ein. Wir zeigen, dass vier Erdgas-Lock-in-Mechanismen die Unterstützung für LNG in Deutschland verursachen: (A) der geopolitische Einfluss der Vereinigten Staaten, kombiniert mit (B) Bedenken hinsichtlich der Versorgungssicherheit aufgrund des geplanten Kohle- und Atomausstiegs, (C) Druck von einer Vielzahl von staatlichen und privaten Akteuren und (D) versunkene Investitionen in die bestehende Gasinfrastruktur. Zwei weitere Mechanismen, die die starke Position des Erdgases unterstützen, sind (E) die Stärke der aufkommenden Nische für synthetisches Gas und (F) die schwache Opposition gegen LNG und Erdgas. Wir weisen auf das stark übersehene Lock-in-Potenzial und die damit verbundenen Emissionen hin, die die Energiewende erschweren und verlangsamen könnten, wenn mehr Länder eine fortgeschrittenere Phase der Energiewende erreichen.

Zwei weitere Papiere sind veröffentlicht worden: Das erste fokussiert sich auf den deutschen Kohleausstieg:

Oei, P.-Y. (2020): Germany's Coal Exit Law: Too Late and Too Expansive. *Baltic Rim Economies Review*, no. 4 (December): 27, <https://sites.utu.fi/bre/germanys-coal-exit-law-too-late-and-too-expansive/>.

Der Expertenartikel diskutiert das deutsche Kohleausstiegsgesetz vom Sommer 2020. Er zeigt auf, dass der darin vereinbarte Kohleausstieg bis 2035-38 veraltet ist und einen Bruch international ratifizierter Klimaschutzziele bedeutet. Der Artikel diskutiert außerdem, dass der gesellschaftlichen Konflikt um die Kohle nicht vollständig gelöst ist, die Zahlungen für Bergwerks- und Kraftwerksbetreiber und Regionen zu hoch und die Anreize für die notwendige (Energie-)Systemtransformation unzureichend sind.

Ein weiteres bereits erschienenes Diskussionspapier untersucht die zukünftige Rolle von Erdgas in Deutschland.

Fitzgerald, L. M., Braunger, I. and Brauers, H. (2019) Destabilisation of Sustainable Energy Transformations: Analysing Natural Gas Lock-in in the case of Germany, STEPS Working Paper 106, Brighton: IDS <https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/20.500.12413/14499>.

In den letzten Jahren hat Erdgas im Zusammenhang mit der Eindämmung des Klimawandels zunehmende Unterstützung erfahren. Es wird als "Brückenenergieträger" bezeichnet, der den Prozess der kohlenstoffarmen Energiewende unterstützen soll. Dies ist angesichts des hohen Treibhauspotenzials von Erdgas, das fast ausschließlich aus dem Treibhausgas Methan besteht, rätselhaft. In dem Papier werden Faktoren aufgezeigt, die der politischen Förderung von Erdgas zugrunde liegen, obwohl es für den Klimaschutz nicht geeignet ist. Auf der Grundlage des Pathways-Ansatzes und unter Rückgriff auf die breitere Literatur zu Institutionen und Regimen werden die Rolle der Akteure und ihrer Netzwerke, Interessen und Politiken sowie Diskurse und Narrative analysiert. Unsere zentrale Behauptung ist, dass die Unterstützung für Erdgas ein Ergebnis institutioneller Strategien ist, die die etablierten Akteure der fossilen Energiewirtschaft eingesetzt haben, um ihr Interessen im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung zu sichern. Wir konzentrieren uns auf die Flüssigerdgas (LNG)-Infrastruktur in Deutschland, als eine repräsentative Fallstudie zum Verständnis der Dynamik der von Unterstützung für Erdgas. Das Papier schließt mit dem Aufzeigen weiterer Forschungsansätze. Insbesondere weisen wir auf spezifische Fehlwahrnehmungen hin die im Diskurs über Erdgas offener angefochten werden müssen, um das Problem des "Lock-in" von Erdgas anzugehen.

Des Weiteren wurden weitere Analysen für Nachbarländer Deutschlands - insb. die Niederlande, Frankreich und die Tschechische Republik - durchgeführt (u.a. durch Gespräche mit lokalen Experten und Sichtung der Literatur) und sind in die Arbeiten des Projektes mit eingeflossen (bspw. im Rahmen von entsprechenden Annahmen in Modellierungsrechnungen).

Auf Basis der Erkenntnisse aus AP1 konnte wie geplant die Modellierung des europäischen Energiesystems erfolgen. Im Bereich der quantitativen Modellierung wurden insbesondere zwei Paper veröffentlicht.

Gerbaulet, C., von Hirschhausen, C., Kemfert, C., Lorenz, C., Oei, P. (2019): European electricity sector decarbonization under different levels of foresight. *Renewable Energy*, 2019, DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.099.

In diesem Papier werden die Auswirkungen der Voraussicht auf die Dekarbonisierungsziele auf die Investitionsentscheidungen im europäischen Elektrizitätssektor anhand eines von den Autor*innen entwickelten spezifischen Modells namens dynELMOD analysiert. Die Einbeziehung der EU Klimaziele macht die Investition in zusätzliche fossile Kapazitäten ab 2025 unwirtschaftlich, was zu einem Ausstieg aus Kohle und Erdgas in den 2040er Jahren führt. Begrenzte Voraussicht führt somit zu gestrandeten Investitionen in fossile Kapazitäten in den 2020er Jahren. Die Verwendung eines CO₂-Budget-Ansatzes führt dagegen zu einer noch stärkeren Emissionsreduzierung in den ersten Perioden vor 2030, was die Gesamtkosten senkt. Wir stellen außerdem fest, dass die erneuerbaren Energien die Hauptlast der Dekarbonisierung tragen; die Kernenergie (3. oder 4. Generation) ist nicht in der Lage, mit anderen Brennstoffen zu konkurrieren und wird daher mit der Zeit auslaufen.

Methodisch verbessert wurde dabei die Berechnung von stranded assets durch die Abbildung von sequentieller Modellierung von verschiedenen Entwicklungspfaden mit und ohne Berücksichtigung von zukünftigen Klimaschutzziele. Durch das Einbauen eines speziellen Zeitalgorithmus wird eine bessere Repräsentation des Jahresverlaufs ohne zu großen Rechenaufwand ermöglicht. Darüber hinaus wird durch verschieden weit in die Zukunft schauende Modellläufe der Unterschied von kurz- gegenüber langfristigen Optimierungszeiträumen simuliert. Basierend auf diesem Papier wurden auch Anpassungen am Global Energy System Model (GENeSYS-MOD) vorgenommen. Das folgende Papier hat analog die Stranded Asset Problematik untersucht. Die Erweiterung von GENeSYS-MOD ermöglichte sowohl eine genauere zeitliche Auflösung als auch eine bessere Abbildung der Sektorkopplung. Dadurch wurde es möglich insbesondere nicht mehr benötigte Investitionen in fossile Energieträger zu identifizieren. Die Ergebnisse sind im Rahmen einer peer-review Publikation in der Zeitschrift *Energy Strategy Reviews* erschienen.

Löffler, Konstantin, Thorsten Burandt, Karlo Hainsch, und Pao-Yu Oei. 2019. „Modeling the Low-Carbon Transition of the European Energy System - A Quantitative Assessment of the Stranded Assets Problem“. *Energy Strategy Reviews* 26 (November). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100422>.

In diesem Papier werden mehrere Pfade für das europäische Energiesystem bis 2050 berechnet, wobei der Schwerpunkt auf einer der größten Herausforderungen des kohlenstoffarmen Übergangs liegt: dem Problem der ungenutzten Kapazitäten und gestrandeten Vermögenswerte. Es werden drei verschiedene Szenarien analysiert, wobei für die Berechnungen das Global Energy System Model (GENeSYS-MOD) verwendet wird. Ein wesentliches Merkmal ist die Einführung von begrenzter Voraussicht und unvollkommener

Planung in den multisektoralen Ansatz des Modells. Ein rascher Übergang zu erneuerbaren Energiequellen ist erforderlich, um das Ziel, die globale Temperatur unter 2 °C zu halten, zu erreichen. Dies führt zu einer Unterauslastung der derzeitigen fossilen Kraftwerkskapazitäten, was durch die Priorisierung kurzfristiger Ziele gegenüber langfristigen Zielen noch verstärkt wird. Im schlimmsten Fall könnten bis 2035 Kapazitäten mit einem Gesamtwert von bis zu 200 Mrd. € bzw. 260 GW Gesamtkapazität gestrandet sein, wobei ein erheblicher Anteil auf den Kohle- und Gassektor entfällt. Im Basisszenario mit perfekter Voraussicht hingegen kann dieser Betrag um bis zu 75 % reduziert werden. Es bedarf also starker, klarer Signale seitens der politischen Entscheidungsträger, um die Gefahr einer kurzsichtigen Planung und von Investitionsverlusten zu bekämpfen.

Ein weiteres Paper zu den Auswirkungen auf das europäische Energiesystem führt eine Bundesländerscharfe Untersuchung für durch.

Bartholdsen, Hans-Karl, Anna Eidens, Konstantin Löffler, Frederik Seehaus, Felix Wejda, Thorsten Burandt, Pao-Yu Oei, Claudia Kemfert, und Christian von Hirschhausen. 2019. „Pathways for Germany’s Low-Carbon Energy Transformation Towards 2050“. *Energies* 12 (15): 2988. <https://doi.org/10.3390/en12152988>.

Wie viele andere Länder hat sich auch Deutschland im Anschluss an das Pariser Abkommen Ziele zur Reduzierung seiner CO₂-Emissionen gesetzt. Die ersten Erfolge bei der Dekarbonisierung des Stromsektors wurden bereits im Rahmen der deutschen Energiewende erzielt. Weitere Schritte in diese Richtung, auch in den Bereichen Wärme und Verkehr, sind jedoch ins Stocken geraten. Dieses Papier beschreibt drei mögliche Pfade für die Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Die Szenarien berücksichtigen die aktuelle Klimapolitik auf globaler, europäischer und deutscher Ebene und beinhalten unterschiedliche Nachfrageprognosen, technologische Trends und Ressourcenpreise. Das Modell umfasst die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr und arbeitet auf Bundesländerebene. Für die Analyse wird das linear kostenoptimierende Global Energy System Model (GENeSYS-MOD) verwendet, um die kosteneffizienten Pfade und Technologiemixe zu berechnen. Es zeigt sich, dass eine CO₂-Reduktion von mehr als 80% im weniger ehrgeizigen Szenario wohlfahrtssteigernd sein kann im Vergleich zu einem Szenario ohne jegliche klimaschützenden Maßnahmen. Sogar noch höhere Dekarbonisierungsraten von 95 % sind machbar und notwendig, um die internationalen Klimaziele zu erreichen, jedoch mit einem hohen Aufwand für die Umstellung des Teilssektors Prozesswärme verbunden. Die in diesem Papier dargestellten Pfade zeigen Chancen und Risiken der Transformation des deutschen Energiesystems unter verschiedenen externen Einflüssen auf.

5.3. AP3: Interaktionen der europäischen Politik

Motivation

Gezielte Maßnahmen zum schrittweisen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen sind bisher auf nationaler Ebene angesiedelt. Die Wirksamkeit solcher Maßnahmen (unabhängig davon, ob

sie marktorientiert sind) hängt jedoch von der Interaktion mit dem EU-Emissionshandelssystem ab. Da die Emissionen des Stromsektors unter das EU-Emissionshandelssystem fallen, könnten sich überschneidende politische Maßnahmen möglicherweise negativ auswirken. Es könnte sein, dass die Emissionen auf EU-Ebene nicht in dem Maße zurückgehen - oder sogar ansteigen -, wie es durch die nationale (einseitige) Politik beabsichtigt war. Dies ist der so genannte Wasserbetteffekt. Obwohl dies zu Beginn des Projekts ein Hauptanliegen war, machten verschiedene politische Entwicklungen (z. B. die Verschärfung der Obergrenze für das Emissionshandelssystem im Jahr 2030 und die Klimaneutralität bis 2050) deutlich, dass der Schwerpunkt auf der Interaktion zwischen nationaler und EU-Politik liegen sollte. Außerdem könnte der Wasserbetteffekt durch ehrgeizigere Ziele vermieden werden, da alle fossilen Brennstoffe stark zurückgedrängt würden. Infolgedessen konzentrieren wir uns nicht nur auf die Auswirkungen von Ausstiegsplänen, sondern auch auf Förderregelungen für erneuerbare Energien und nationale Ziele im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems. Dadurch konnten wir eine umfassendere Analyse erstellen, die über eine reine Modellanalyse hinausgeht und die politischen Auswirkungen ehrgeizigerer Ziele erfasst. Infolgedessen ist die Zahl der daraus resultierenden Veröffentlichungen und ihre Relevanz wesentlich größer als ursprünglich beabsichtigt.

Methodik

Arbeitspaket 3 nutzt insbesondere das langfristige Investitionsmodell für den Stromsektor (LIMES-EU). Für diese spezielle Aufgabe wurde das Modell so erweitert, dass es die gesamten EU-EHS-Emissionen abdeckt, indem es eine grobe Modellierung der Emissionen energieintensiver Industrien enthält und die Marktstabilitätsreserve (MSR) simuliert und durch einen iterativen Ansatz mit LIMES gekoppelt wird. Weitere Verbesserungen des Modells waren die Einbeziehung einer stilisierten Darstellung des Gebäudesektors, um die sich daraus ergebende Belastung für das EU-EHS abzuschätzen, die Einbeziehung neuer relevanter Technologien (z. B. BECCS und Fernwärmetechnologien), die Aktualisierung der Modellparameter (z. B. Nachfrage und Kosten) und die Kalibrierung des Modells für 2015 und teilweise für 2020.

Ergebnisse/Schlussfolgerung

Aus dieser Aufgabe resultierten sechs Papiere, darunter eine qualitative Analyse und fünf quantitative modellgestützte Analysen. Vier davon wurden in Fachzeitschriften mit Peer-Review veröffentlicht, eine in einem deutschen Magazin für politische Entscheidungsträger und die andere wurde als internes Papier verbreitet.

Das erste Papier gibt einen Überblick über die damaligen Ausstiegspläne in der EU und entwickelt ein Konzept für den Wasserbetteffekt, der sich daraus ergeben könnte. Am Beispiel des deutschen Kohleausstiegsplans liefert das Papier einen Rahmen zur Entflechtung des Wasserbetteffekts.

Osorio, Sebastian und Michael Pahle. 2020. „ Development of a conceptual and theoretical framework for the analysis of policy interactions between national and EU level “. Available in <https://www.pik-potsdam.de/members/osorio/internal-paper-fff-task-3.1>.

In diesem Papier wird ein theoretischer Rahmen für ein besseres Verständnis der Interaktion zwischen nationalen Maßnahmen und dem EU-EHS geschaffen. Wir konzentrieren uns auf die Pläne für den Kohleausstieg und geben zunächst einen Überblick über den Stand der Dinge auf EU-Ebene. Bis September 2019 haben 14 EU-Mitglieder den Ausstieg aus der Kohleverstromung vor 2030 beschlossen (oder bereits vollzogen), ein Land (Deutschland) wird dies bis 2038 tun, sieben Länder haben keine Kohle in ihrem Strommix und zwei diskutieren darüber. Auf den ersten Blick sollten diese Pläne mittel- und langfristig zu einer Verringerung der Emissionen führen. Allerdings könnten sich überschneidende Maßnahmen (d. h. nationale Maßnahmen und das EU-EHS) gegenseitig untergraben, wenn sie im gleichen geografischen Gebiet angewandt werden, da es zu Wechselwirkungen kommen kann. Dies wird durch den Wasserbetteffekt erklärt, d. h. während in dem Land, in dem die Politik umgesetzt wird, Reduzierungen stattfinden, könnten die Emissionen in anderen Ländern aufgrund der Funktionsweise des EU-EHS (Cap-and-Trade-System) ansteigen. Aufbauend auf der bisherigen Literatur schlagen wir einen Rahmen vor, um einen solchen Effekt zu entschlüsseln. Wir wenden dies auf den deutschen Kohleausstieg an. Der Gesamteffekt erklärt sich demnach aus dem internen Kohlenstoffleck (aufgrund der höheren Auslastung der verbleibenden Kohlekraftwerke) und dem Wasserbetteffekt (aufgrund der niedrigeren Kohlenstoffpreise, die zu einer verstärkten Produktion fossiler Brennstoffe anregen). Die Quantifizierung des Gesamteffekts ist nicht einfach, da die MSR eingeführt wurde, und da die niedrigeren Kohlenstoffpreise die Dynamik des Zertifikate-Bankings und damit den aktuellen Emissionspfad beeinflussen. Der Gesamteffekt ist daher unbestimmt - und muss für die Risikobewertung mithilfe numerischer Modelle quantifiziert werden.

Auch wenn die Länder ihre Ambitionen noch einseitig erhöhen könnten, ist klar, dass ein koordiniertes Vorgehen auf EU-Ebene erwünscht ist. Darüber hinaus erfordere die langfristig angestrebte Klimaneutralität bereits mittelfristig verstärkte Maßnahmen. Dementsprechend strebt die EU eine Verschärfung ihrer Klimaziele an und schlägt im Rahmen des so genannten EU Green Deal eine Reihe von Maßnahmen vor, deren Hauptziel darin besteht, ihr Emissionsreduktionsziel bis 2030 von 40 % auf 55 % gegenüber 1990 zu erhöhen. Dieses ehrgeizige Ziel wird in Ziele für die EHS- und Nicht-EHS-Sektoren umgesetzt. Der größte Teil der Reduktionen entfällt auf das EHS, zu dem auch der Stromsektor gehört. Im folgenden Papier werden die Auswirkungen der ehrgeizigeren EU-Ziele für 2030 auf den Energiesektor bewertet.

Pietzcker, R.C., Osorio, S., Rodrigues, R., 2021. „Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector“. Appl. Energy 293, 116914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116914>

In diesem Papier wird untersucht, wie sich der Energiesektor als Reaktion auf ein strengeres EU-EHS-Ziel verändern müsste, und es werden die technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen analysiert. Um die wichtigsten EHS-Sektoren abzudecken, kombinieren wir ein detailliertes Modell des Energiesektors mit einer Darstellung der Grenzvermeidungskostenkurve für die Emissionsverringerung der energieintensive Branchen. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass eine Verschärfung des Ziels den Wandel in den verschiedenen Teilen des Stromsystems um 3 bis 17 Jahre beschleunigen würde, wobei erneuerbare Energien im Jahr 2030 74% des Stroms liefern würden, die EU-weite Kohlenutzung bis 2030 statt bis 2045 fast vollständig auslaufen würde und bis 2040 eine emissionsfreie Stromerzeugung erreicht würde. Die Kohlenstoffpreise im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems würden sich auf 129 €/tCO₂ im Jahr 2030 mehr als verdreifachen, wodurch die kumulierten Emissionen des Stromsektors von 2017 bis 2057 um 54% im Vergleich zu einem Szenario mit dem derzeitigen Ziel sinken würden. Dieser Wandel wäre mit begrenzten Kosten verbunden: Die diskontierten Gesamtkosten des Stromsystems würden nur um 5% steigen. Wir testen unsere Ergebnisse anhand einer Reihe von Sensitivitäten: Eine erhöhte Stromnachfrage, die sich aus der Sektorkopplung ergeben könnte, erhöht den Einsatz von Wind- und Solarenergie und verlängert den Gasverbrauch. Wenn der Ausbau der Übertragungskapazitäten nicht über das Niveau von 2020 hinausgeht, werden Investitionen von der Windenergie auf die Photovoltaik, Wasserstoff und Batterien verlagert, was die Gesamtsystemkosten um 3% erhöht. Schließlich hat die Nichtverfügbarkeit der fossilen Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) oder weiterer Investitionen in die Kernenergie keine Auswirkungen auf die Ergebnisse. Die Nichtverfügbarkeit von CCS auf Bioenergiebasis (BECCS) hat sichtbare Auswirkungen (18% Anstieg) auf die kumulierten Emissionen des Stromsektors, wodurch ein größerer Teil der Minderungslast auf den Industriesektor verlagert wird. Dies führt aber nicht zu einem Anstieg der Strompreise oder der Gesamtsystemkosten (<1% Anstieg).

Die Auswirkungen der erhöhten Stromnachfrage, die sich aus der verstärkten Sektorkopplung ergibt, wurden in dem vorangegangenen Papier teilweise analysiert. Es wird erwartet, dass die Elektrifizierung eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung sowohl des Gebäude- als auch des Verkehrssektors spielen wird. Der Gebäudesektor und der Stromsektor sind jedoch enger miteinander verwoben, da die Dekarbonisierung des Stromsektors auch durch den Ausbau der Fernwärme erreicht werden kann. Dies bedeutet eine tiefgreifende Umgestaltung des Stromsektors und hat erhebliche Auswirkungen auf das EU-Emissionshandelssystem, da es bereits sehr ehrgeizige Ziele zu erfüllen hat. Das Ausmaß dieses Drucks hängt zum Teil von den Renovierungsraten, d. h. von den Energieeffizienzgewinnen, in Gebäuden ab. Zu diesem Zweck erweitern wir das Modell LIMES-EU: Wir leiten Wärmeprofile ab und implementieren ein stilisiertes Gebäudemodell in ein detailliertes EHS-Modell, das uns Einblicke in die Interaktion zwischen dem EHS- und Nicht-EHS-Sektor ermöglicht. Im folgenden Papier bewerten wir die Auswirkungen der Anforderungen an die Dekarbonisierung von Gebäuden auf das EU-EHS vor dem Hintergrund ehrgeizigerer Klimaziele, wie sie im EU Green Deal vorgeschlagen werden.

Osorio, S., Levesque, A., Pahle, M., Ruhnau, O., Gueret, A., Pietzcker, R., 2022. What buildings decarbonisation means for the EU ETS. Working Paper (accepted to the International Energy Workshop 2022) available in <https://www.pik-potsdam.de/members/osorio/paper-heating-iew2022>

Die Anstrengungen zur Dekarbonisierung von Gebäuden müssen verstärkt werden, um die ehrgeizigeren Ziele des Green Deal der EU zu erreichen. Bisher konzentrierten sich die Maßnahmen zur Dekarbonisierung von Gebäuden auf die Senkung der Energienachfrage. Neben der Energienachfrage hängt die Emissionsreduzierung jedoch entscheidend von der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ab, d. h. von der schrittweisen Abschaffung fossiler Heizkessel und deren Ersetzung durch Wärmepumpen oder Fernwärme. Die historischen Erfahrungen werfen Zweifel auf die Wirkung der Politik darin, die Energienachfrage zu senken. Der Energiesektor wird somit am Scheideweg der Dekarbonisierung von Gebäuden stehen, was letztlich zusätzlichen Druck auf das EU-Emissionshandelssystem ausübt. Ziel dieses Papiers ist es, die erforderlichen Investitionen zur Dekarbonisierung von Gebäuden und ihre Auswirkungen auf das EU-Emissionshandelssystem zu bewerten. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass eine Erhöhung der Renovierungsrate von 0,5 % auf 3 % und damit eine Verringerung der Nachfrage um bis zu 20% nur begrenzte Auswirkungen auf die Kohlenstoffpreise hat (+3%, von 250 €/tCO₂ auf 259 €/tCO₂). Dennoch ist die erforderliche Umgestaltung des Stromsektors zur langfristigen Deckung des gesamten Gebäudebedarfs erheblich: Zwischen 2015 und 2030 müssen die Emissionen um 85% gesenkt werden, und bis 2050 sollen 90 % der Gesamtversorgung durch variable erneuerbare Energien gedeckt werden. Wir stellen außerdem fest, dass die Wärmeversorgung in einem optimierten System fast vollständig auf dezentralen Wärmepumpen beruhen würde, während der Anteil der Fernwärme höchstens 20% erreichen würde. Allerdings gibt es bemerkenswerte regionale Unterschiede: In den nordischen und baltischen Ländern, sowie in Polen bleibt die Fernwärme die wichtigste Wärmequelle. Innerhalb des Fernwärme-Energiemixes gibt es ebenfalls einen bedeutenden Wandel, da reine Wärmekraftwerke zum Nachteil von KWK-Anlagen immer mehr an Bedeutung gewinnen werden. Im Einzelnen wird die Fernwärme langfristig von reinen Gaswärmeanlagen, großen Wärmepumpen und Wasserstoff-KWK abhängen.

Neben den neuen, ehrgeizigeren Zielen wurde das EU-Emissionshandelssystem zuvor reformiert und die Marktstabilitätsreserve (MSR) als Mechanismus zum Ausgleich des Ungleichgewichts zwischen Angebot und Nachfrage und zum Abbau des Überschusses an Kohlenstoffzertifikaten auf dem Markt eingeführt. Die Möglichkeit, einige dieser Zertifikate zu annullieren, bedeutet jedoch, dass die MSR als Mechanismus zur weiteren Verschärfung des EU-Emissionshandelssystems und zur Erzielung zusätzlicher Emissionsreduktionen genutzt werden könnte. In Anbetracht der Tatsache, dass die MSR im Jahr 2021 zum ersten Mal überprüft werden soll, wollten wir die Funktionsweise der MSR besser verstehen. Im folgenden Papier analysieren wir die Auswirkungen seiner Parameter auf die langfristigen Emissionen und bewerten, wie sich eine Verschärfung der Obergrenze des EU-EHS auf die Funktionsweise der MSR auswirkt.

Osorio, S., Tietjen, O., Pahle, M., Pietzcker, R.C., Edenhofer, O., 2021. Reviewing the Market Stability Reserve in light of more ambitious EU ETS emission targets. *Energy Policy* 158, 112530. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112530>

Die Strenge des EU-EHS wird zwangsläufig verschärft werden, um die ehrgeizigeren Ziele des Green Deal der EU zu erreichen. Bei der Verschärfung der Obergrenze müssen die Wechselwirkungen mit der Marktstabilitätsreserve (MSR) berücksichtigt werden, die 2021 überprüft werden soll. Wir analysieren diese Fragen mithilfe des Modells LIMES-EU. Zunächst untersuchen wir, wie sich die Überarbeitung der MSR-Parameter auf die Stornierung von Zertifikaten auswirkt. Wir stellen fest, dass eine Änderung der wichtigsten Auslegungsparameter zu Annullierungen im Bereich von 2,6 bis 7,9 Gt führt - im Vergleich zu 5,1 Gt unter der derzeitigen Regelung. Insgesamt haben die Schwellwerte, die festlegen, wann eine Aufnahme in die MSR bzw. eine Entnahme aus der MSR erfolgt, die größten Auswirkungen. Aufnahmeraten über 12 % haben nur eine begrenzte Wirkung und führen zu einem schwankenden Aufnahmeverhalten. Zweitens analysieren wir, wie ehrgeizigere Klima-2030-Ziele durch Anpassung des linearen Reduktionsfaktors (LRF) erreicht werden können. Wir stellen fest, dass der LRF die MSR-Stornierungen bis zu 10,0 Gt deutlich erhöht. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung des LRF von derzeit 2,2 % auf nur 2,6 % mit einem EU-weiten Ziel von -55 % bis 2030 vereinbar wäre. Die Stornierung durch die MSR ist jedoch mit großer Unsicherheit behaftet, was die Komplexität des Marktes erhöht und zu einer hohen Preisunsicherheit führt.

In den vorangegangenen Papieren wurden die Auswirkungen auf EU-Ebene behandelt. Obwohl wir das EHS/ESR-Konstrukt berührten, konzentrierten sie sich hauptsächlich auf das EU-EHS und insbesondere auf den Stromsektor. Im folgenden Papier bewerten wir, wie sich unterschiedliche Aufteilungsregeln zwischen dem EHS und der ESR auf die Emissionen in Deutschland auswirken könnten und diskutieren Alternativen, um den Druck entweder auf den EHS- oder den Nicht-EHS-Sektor zu verringern.

Pahle, M., Tietjen, O., Osorio, S., Knopf, B., Flachslund, C., Korkmaz, P., Fahl, U., 2020. „Die Anschärfung der EU-2030-Klimaziele und Implikationen für Deutschland“. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 70, 10–13.

Der veröffentlichte Artikel skizziert die quantitativen Konsequenzen unterschiedlicher Aufteilungen einer EU 2030-Klimazieleverschärfung zwischen EHS- und non-EHS Sektoren, mögliche resultierende Druckpunkte und potenzielle Ventile zur Entlastung. Dabei werden Herausforderungen des Erreichens ambitionierter Klimaziele bis 2030 sichtbar.

Das obige Papier zeigt also, wie die Umsetzung ehrgeizigerer Ziele tatsächlich die gesamte Wirtschaft unter Druck setzt. Dies könnte Auswirkungen auf die Akzeptanz der Kohlenstoffpreispolitik und letztlich auf die Bereitschaft der politischen Entscheidungsträger haben, an den erforderlichen ehrgeizigen Zielen festzuhalten. Im Energiesektor wird die Dynamik der Kohlenstoffpreise besonders durch die Förderung erneuerbarer Energien beeinflusst. Im letzten Beitrag analysieren wir die Auswirkungen von Förderprogrammen für

erneuerbare Energien auf deren Kapitalkosten, wie diese die Kohlenstoffpreise beeinflussen und wie steigende Kohlenstoffpreise letztlich auf die Politik zurückwirken.

Pahle, M., Tietjen, O., Osorio, S., Egli, F., Steffen, B., Schmidt, T.S., Edenhofer, O., 2022. Safeguarding the energy transition against political backlash to carbon markets. *Nat Energy* 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-00984-0>

Erhebliche Kostensenkungen bei den erneuerbaren Energien (EE) haben die Aussicht auf eine subventionsfreie Ära der Energiewende eröffnet. Die geplanten politischen Eckpfeiler dieser Ära sind die Kohlenstoffmärkte, die wirtschaftliche Anreize für den weiteren Ausbau der EE schaffen sollen. Dabei wird jedoch übersehen, dass die Aussetzung der EE gegenüber Marktrisiken und steigenden allgemeinen Zinssätzen zu wesentlich höheren Finanzierungskosten führen würde, was wiederum zu einem viel steileren Kohlenstoffpreispfad führen würde. Der daraus resultierende politische Druck könnte einen preisdrückenden regulatorischen Eingriff provozieren, der den weiteren Ausbau der EE unterbricht. Im Folgenden wird diese Rückkopplung konzeptualisiert und es werden Indikatoren für das Risiko eines solchen Eingriffs abgeleitet. Bei der Quantifizierung dieser Indikatoren für die Europäische Union stellen wir fest, dass erhöhte Finanzierungskosten langfristig zu einer Verdoppelung der Kohlenstoffpreise, einer Halbierung der Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien in den nächsten 15 Jahren und zu einer beträchtlichen Steigerung der Gewinne von Kraftwerken für fossile Brennstoffe führen könnten. Dies birgt ein erhebliches Risiko von Rückschlägen, gegen die sich die politischen Entscheidungsträger absichern sollten.

5.4. AP4: Flexibilität und Sektorkopplung

Motivation

Im Stromsektor impliziert der Ausstieg aus fossilen Energieträgern eine sehr starke Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energien, insbesondere der Windkraft und der Photovoltaik. Die Integration dieser Technologien in das Energiesystem steigert die Nachfrage nach zeitlicher Flexibilität im Gesamtsystem erheblich. Wichtige Optionen für Flexibilität sind verschiedene Typen von Energiespeichern, Stromnetze sowie Lastverschiebungen auf Seite der Stromnachfrage. Letztere betreffen sowohl die heute bereits existierende Stromnachfrage, aber auch und vermutlich in noch stärkerem Maße künftige zusätzliche Lasten, die bei einer verstärkten Sektorenkopplung entstehen. Die Sektorenkopplung ermöglicht die Nutzung von erneuerbarem Strom in bisher nicht elektrifizierten Endenergiebereichen, beispielsweise im Verkehr. Dadurch kann die Nutzung fossiler Energieträger mitsamt der dazugehörigen Treibhausgasemissionen verringert werden.

Der künftige Bedarf an Flexibilität, z.B. an Stromspeichern, sowie das Zusammenspiel mit verschiedenen Optionen der Sektorenkopplung, die je nach Betriebsweise sowohl das Flexibilitätsangebot als auch die Flexibilitätsnachfrage erhöhen könnten, war bisher vergleichsweise wenig beforscht. Daneben besteht weiterer Forschungsbedarf dazu, welche

sozioökonomischen Implikationen die Bereitstellung von Infrastruktur zur erneuerbaren Stromerzeugung und zur Bereitstellung von Flexibilität hat. In Hinblick auf Letzteres haben wir uns im Projekt auf die Lebenszufriedenheits-Effekte von Bioenergieanlagen und Stromübertragungsnetze fokussiert, da sozioökonomische Aspekte dieser Technologien – im Gegensatz etwa zur Windenergie – noch kaum untersucht wurden.

Wie in Abschnitt 2.1.4. bereits genannt wurden diese thematisch breiten Arbeiten in drei separate Tasks gegliedert. In Task 4.1 wurden theoretische bzw. stilisierte Analysen zu Flexibilitätsaspekten von fluktuierenden erneuerbaren Energien und der Sektorenkopplung vorgenommen. Dazu gehörten generische und illustrative Darstellungen wichtiger Zusammenhänge sowie eine Analyse zu unbeabsichtigten Effekten der Abbildung von Mindestanteilen für erneuerbare Energien in Stromsektormodellen. In Task 4.2 wurden entsprechende numerische Analysen durchgeführt, sowohl zur Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger in makroökonomischen Modellen, als auch zu Flexibilitätsaspekten künftiger Elektrofahrzeugflotten im Gesamtsystem. Task 4.3 widmete sich empirischen Analysen zu den sozioökonomischen Implikationen von Energieinfrastrukturen.

Methodik

In den drei Tasks 4.1 bis 4.3 wurden unterschiedliche methodische Ansätze verwendet. In den Tasks 4.1 und 4.2 handelt es sich um analytische Problemformulierungen, Illustrationen mithilfe von Residuallast-Dauerkurven sowie numerische Arbeiten mit verschiedenen Versionen des quelloffenen, kostenminimierenden Stromsektormodells DIETER. In Task 4.3 wurden panelökonometrische Methoden basierend auf Daten des sozio-ökonomischen Panels (SOEP) angewandt, mit einem Fokus auf den Indikator der allgemeinen Lebenszufriedenheit. Weitere Angaben hierzu finden sich im nächsten Abschnitt direkt bei den jeweiligen Arbeiten, bzw. in deutlich größerer Detailtiefe in den jeweils genannten Arbeitspapieren.

Ergebnisse/Schlussfolgerung

In **Task 4.1** wurden zwei Artikel verfasst, die einem breiten wissenschaftlichen Publikum einen Einblick in wichtige grundsätzliche Zusammenhänge von Flexibilität und Sektorenkopplung bei der Nutzung fluktuierender Erneuerbarer Energien geben sollen. Im ersten dieser beiden Paper wurden mit Hilfe von Residuallast-Dauerkurven Flexibilitätsaspekte der Sektorenkopplung anhand ihrer Interaktion mit Stromspeichern illustriert und so eine Intuition für grundsätzliche Effekte gegeben. Die grafischen Darstellungen, die auf einer im Projektkontext erarbeiteten, vereinfachten Version des quelloffenen Modells DIETER basieren, wurden eingebettet in eine zusammenfassende Einordnung der sich wandelnden Rolle von Stromspeichern beim Ausbau der erneuerbaren Energien. Dabei wurden auch relevante Metriken verglichen, z.B. Speicherenergie und -leistung im Verhältnis zur Jahresenergie und Jahresspitzenlast. Die Analyse wurde im international Fachjournal *Joule* veröffentlicht (free access, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.022>). Das Paper wurde auch bei einem auf das

Thema Energiespeicher fokussierten Online-Workshop des Projekts FFF am 9.10.2020 vorgestellt.

Ein zweites Paper wurde in Form eines Reviewartikels zur Ökonomie von fluktuierenden erneuerbaren Energien und Stromspeichern erarbeitet. Er enthält eine erweiterte Fassung der oben genannten, auf einer reduzierten Version des Modells DIETER basierenden Darstellungen. Hier wurden zusätzlich die Effekte auf Marktpreise (merit order effect) und Marktwerte (cannibalization effect) illustriert. Der Artikel wurde im internationalen Fachjournal *Annual Review of Environmental Economics* veröffentlicht (<https://doi.org/10.1146/annurev-resource-101620-081246>).

Anknüpfend an diese Arbeiten wurden grundsätzliche theoretische Überlegungen zur Interpretation von Großhandelspreisen in kostenminimierenden Energiemodellen angestellt, wobei die Interpretation modellierter Preise für Sektorenkopplungsstrom von besonderem Interesse ist. Anhand eines einfachen Modells zeigte sich, dass modellierte Großhandelspreise in optimalen Lösungen restringierter Stromsektormodelle nicht zwingend den gesamten Systemkosten entsprechen müssen, und dass entsprechende Vorsicht bei ihrer Interpretation angebracht ist. Eine analytische Beschreibung dieser Problematik wurde in Form eines Arbeitspapiers begonnen, das bis zum Ende der Projektlaufzeit jedoch nicht fertig gestellt werden konnte. Die Arbeiten sollen nach Projektende in anderem Kontext weitergeführt und das Paper zum Abschluss gebracht werden. Ein Teilergebnis dieser analytischen Arbeiten war, dass Modellrestriktionen zum Anteil erneuerbarer Energien unbeabsichtigte Folgen haben können. Dementsprechend flossen einige der analytischen Überlegungen und Darstellungen auch in das nachfolgend genannte Paper ein.

Ergänzend zu den oben genannten Publikationen wurde ein weiterer Fachartikel erarbeitet, der unbeabsichtigte Effekte der Modellierung von Mindestanteilen für erneuerbare Energien in Stromsektormodellen detailliert untersucht. Darin zeigen wir, dass bindende Vorgaben zum Anteil erneuerbarer Energien die modellierte Nutzung von Speichern und Optionen der Sektorenkopplung verzerren kann. Dies erscheint relevant, da viele modellbasierte Analysen von Zukunftsszenarien mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien bindende Randbedingungen zum Anteil erneuerbarer Energien beinhalten. In dem Fachartikel werden konzeptionelle und analytische Überlegungen vorgestellt, die mit einer stilisierten Version des quelloffenen Modells DIETER illustriert werden. Er wurde im internationalen Fachjournal *iScience* veröffentlicht (<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104002>). Die Arbeiten wurden, genauso wie das oben bereits genannte Paper, auch beim Online-Speicher-Workshop des Projekts FFF am 9.10.2020 vorgestellt.

In **Task 4.2** wurden drei quantitativ-numerische Arbeiten im Themenfeld Flexibilität und Sektorenkopplung durchgeführt. Das erste Arbeitspapier widmet sich der Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger in makroökonomischen Modellen. In Makromodellen werden oft aggregierte Produktionsfunktionen genutzt, z.B. solche mit konstanter oder variabler Substitutionselastizität (CES bzw. VES). Von Interesse ist, inwiefern die Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger in solchen

Produktionsfunktionen adäquat abgebildet werden kann. Mit Hilfe einer stilisierten Version des quelloffenen Stromsektormodells DIETER wurden entsprechende Produktions-Isoquanten gefittet. Es zeigt sich, dass sowohl CES- als auch VES-Funktionen diese Substitution adäquat abbilden können. Der Austausch fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien wird außerdem leichter, wenn eine Mischung von erneuerbaren Technologien und Stromspeichern verfügbar ist. Diese Arbeit überträgt somit einen Teil der im Projekt FFF erarbeiteten und angewandten Stromsektormodellierungs-Expertise in die Welt der makroökonomischen Modellierung. Der Fachartikel befand sich zum Ende des Projektzeitraums in Begutachtung bei einem internationalen ökonomischen Fachjournal (Preprint: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.795779.de/dp1885.pdf).

In einem zweiten Fachartikel wurde die im Projekt erarbeitete Weiterentwicklung des Modells DIETERpy dokumentiert. Diese Weiterentwicklung ist die Grundlage für detaillierte numerische Analysen mit DIETER im Themenfeld Flexibilität und Sektorenkopplung. Der Fokus lag dabei auf einer Konsolidierung verschiedener bestehender Versionen mit unterschiedlichen Sektorenkopplungsoptionen sowie auf einer Python-Integration des GAMS-Modells. Ein solcher Python-Wrapper erlaubt es, sowohl für die Aufbereitung der Inputdaten als auch für das Post-Processing auf vielfältigen und mächtigen Python-Libraries zuzugreifen. Außerdem können Szenarioanalysen mit verschiedenen Inputdaten deutlich einfacher parametrisiert und ausgeführt werden. Diese umfangreichen Modellierungsarbeiten wurden synergetisch mit dem ebenfalls vom BMBF geförderten Vorhaben ARIADNE durchgeführt. Das neue Modell wurde der Allgemeinheit quelloffen als Python Package (<https://pypi.org/project/dieterpy/>) sowie über GitLab (https://gitlab.com/diw-evu/dieter_public/dieterpy) zur Verfügung gestellt. Ein beschreibender methodisch fokussierter Fachartikel wurde im internationalen Fachjournal *SoftwareX* veröffentlicht (<https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100784>).

Mit der weiterentwickelten DIETERpy-Modellversion wurden dann die Stromsektorinteraktionen künftiger Elektrofahrzeugflotten numerisch untersucht. Hier stellt sich die Frage, wie die zusätzliche Nachfrage künftiger Elektrofahrzeugflotten nach erneuerbarem Strom gegenüber ihrem zusätzlichen Flexibilitätspotential für die Integration erneuerbarer Energien zu bewerten ist. Letzteres ergibt sich daraus, dass die Fahrzeugbatterien im Rahmen der Grenzen, die sich aus der verfügbaren Ladeleistung und dem Stromverbrauch der Fahrzeuge ergeben, grundsätzlich zeitlich flexibel be- und ggf. auch entladen werden können. Wesentliche Modellinputs für eine derartige Analyse sind Zeitreihen des Energieverbrauchs und der Ladeverfügbarkeit künftiger Elektrofahrzeugflotten. Diese Zeitreihen werden mit dem ebenfalls quelloffenen, am DIW Berlin entwickelten Tool *emobpy* generiert. Die Modellergebnisse zeigen, dass bei kleinen Fahrzeugflotten und optimistischen Annahmen zum Flexibilitätspotenzial der Fahrzeuge der Flexibilitäts-Vorteil den Nachfrageeffekt deutlich überwiegen kann. Je größer die Fahrzeugflotte wird und je restriktiver die Annahmen zur Bereitstellung von Flexibilität, desto stärker fällt jedoch die zusätzliche Nachfrage nach erneuerbarem Strom im Gesamtsystem ins Gewicht. Die Möglichkeit der Rückspeisung von Strom aus den Fahrzeugbatterien in das Netz (Vehicle-to-Grid, V2G) hat

dabei einen besonders großen positiven Flexibilitäts-Effekt. Am Ende der Projektlaufzeit lagen die Ergebnisse in Form eines noch unveröffentlichten Arbeitspapiers vor. Es soll nach Projektende finalisiert und bei einem internationalen Fachjournal zur Begutachtung eingereicht werden. Zwischenergebnisse wurden – gemeinsam mit den beiden oben genannten Papern – beim Online-Speicher-Workshop des Projekts FFF am 9.10.2020 vorgestellt.

In **Task 4.3** wurden zwei Fachartikel verfasst, einer zu einer erneuerbaren Stromerzeugungstechnologie, einer zu einer wesentlichen Flexibilitätsoption. Im ersten Artikel wurde eine Untersuchung zu den Auswirkungen von Bioenergie-Anlagen auf die Lebenszufriedenheit vorgenommen. Hierzu wurde ein Datensatz zu sämtlichen Biomasseanlagen in Deutschland mit Haushaltsdaten aus dem sozio-ökonomischen Panel (SOEP) zusammengeführt. Dabei wurden auch die vorherrschenden Windrichtungen beachtet, um mögliche negative externe Effekte zu separieren, wie etwa eine Geruchsbelästigung von anderen negativen Einflüssen, eine Veränderung des Landschaftsbildes oder ein erhöhtes Verkehrsaufkommen. Die Ergebnisse zeigen einen moderat negativen Einfluss der Errichtung einer neuen Biomasseanlage auf die Lebenszufriedenheit in Haushalten in dessen unmittelbarer Umgebung. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Windrichtungen deuten auf Geruchsemissionen als relevante Quelle negativer Externalitäten hin; allerdings sind die Effekte insgesamt nur schwach ausgeprägt. Zum Ende der Projektlaufzeit befand sich der Artikel im Begutachtungsprozess eines internationalen Fachjournals (Preprint: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.809799.de/diw_sp1116.pdf).

Der zweite Arbeitsstrang dieses Tasks widmete sich den Stromübertragungsnetzen als eine der wesentlichen Flexibilitätsoptionen. Analog zur oben genannten Arbeit wurde auch hier eine Analyse zu den Effekten des Übertragungsnetzausbaus auf die Lebenszufriedenheit vorgenommen. Hierzu wurde ein neuer Datensatz der exakten Standorte der Masten im deutschen Hoch- und Höchstspannungsnetz erstellt und mit Haushaltsdaten des sozio-ökonomischen Panels (SOEP) zusammengeführt. Die Ergebnisse deuten auf eine statistisch signifikante negative Korrelation zwischen der Lebenszufriedenheit eines Haushalts und der Nähe des Wohnortes zu Übertragungsleitungen hin. Am Ende der Projektlaufzeit lag ein noch unveröffentlichtes Arbeitspapier vor, das nach Projektende noch um zusätzliche Robustheitschecks ergänzt und danach zur Begutachtung bei einem internationalen Fachjournal eingereicht werden soll.

5.5. AP5: Einbeziehung von Interessengruppen und Verbreitung von Informationen

Motivation

Um die Potenziale und Herausforderungen eines Ausstiegs aus fossilen Energieträgern zu analysieren war es wichtig mehrere Energieträger, insbesondere Kohle und Erdgas, sowie mehrere Länder in verschiedenen Stadien des Ausstiegs, insbesondere Deutschland,

Großbritannien und Polen, zu betrachten. Um dann ein tiefes Verständnis der Historie, der aktuellen Situation und zukünftigen Möglichkeiten zu erhalten, ist es wichtig diverse Interessengruppen und deren Positionen zu verstehen. Der Austausch mit den Interessensgruppen bot neben dem Informationsgewinn auch das Potenzial Projektergebnisse zu verbreiten.

Methodik

Es wurden eine Reihe von Workshops selbst ausgerichtet, sowie weitere Workshops besucht um Forschungsergebnisse sowohl zu generieren als auch zu präsentieren. Zusätzlich wurden semi-strukturierte Interviews mit Expert*innen in Großbritannien als Grundlage für die qualitative Forschung durchgeführt.

Ergebnisse/Schlussfolgerung

Die Workshops die im Laufe des Projekts organisiert wurden waren insbesondere ein Expertenworkshop zu Erdgasnutzung in Deutschland, ein Storage Workshop, ein Workshop über das Design von globalen Kohleausstiegen und ein Abschlussworkshop am Ende der Projektlaufzeit, sowie eine Reihe von Stakeholder Treffen zum Thema Erdgasnutzung in Deutschland und Europa:

- 14. Mai 2019: Geschlossener Workshop „Erdgasnutzung, Flüssiggasinfrastruktur und Dekarbonisierung in Deutschland“ mit insgesamt 15 Teilnehmenden aus Industrie, Zivilgesellschaft und Forschung. Bei diesem wurden das Forschungsdesign und die Forschungsfragen des FFF Forschungsprojekts präsentiert und diskutiert. Der Fokus des Workshops lag dabei auf den Trends der Gasnutzung in Deutschland. Es wurden Potentiale und Hindernisse für die Gasnutzung im Allgemeinen sowie insbesondere von Flüssigerdgas diskutiert. Dabei wurde im speziellen auf Aspekte des Klimaschutzes, der Versorgungssicherheit, volks- und privatwirtschaftlichen Kosten und Wettbewerbsfähigkeit eingegangen.
- 25. Juni, 2019; 02. Oktober 2019; 15. Januar 2020; 23. September 2020; 09. Dezember 2020; 20. Mai 2021: Seit diesem ersten Treffen organisiert die TU Berlin zusätzliche Treffen mit weiteren Stakeholdern mit jeweils 10-20 Teilnehmenden, um weitere Fragen insbesondere in Bezug auf die Rolle von Erdgas in Deutschland und Europa zu untersuchen.
- 09. Oktober 2020: In Kooperation mit den Projektpartnern hat das DIW Berlin einen Online-Workshop mit dem Titel „The role of energy storage in power sectors with fossil fuel phase out“ durchgeführt, der sich auf die Rolle von Energiespeichern in verschiedenen Arbeiten des Projekts fokussierte. Er ersetzte pandemiebedingt den ursprünglich am DIW Berlin als in-person-meeting geplanten Zwischenworkshop. In Abstimmung mit allen Projektpartnern haben wir entschieden, dem Workshop einen thematischen Rahmen zu Energiespeichern zu geben. Neben drei Arbeiten des DIW Berlin aus den AP 4.1 und 4.2 wurden auch zwei Arbeiten der TU Berlin und eine des

PIK präsentiert und mit externen ExpertInnen diskutiert. Beim Workshop wurden folgende Vorträge gehalten, deren Folien auf der Homepage der Veranstaltung gemeinsam mit der Agenda dauerhaft zum Download bereitstehen (https://www.diw.de/en/diw_01.c.799591.en/events/the_role_of_energy_storage_in_power_sectors_with_fossil_fuel_phase-out.html):

- Wolf-Peter Schill: Electricity storage and the renewable energy transition
 - Carlos David Gaete Morales: Power sector effects of electric vehicle batteries
 - Sebastian Osorio: Energy storage in EU scenarios of the EU Green Deal
 - Mario Kendzioriski: Storage in scenarios of a decarbonized European energy system
 - Martin Kittel: Renewable energy targets and the storage cycling trap
 - Leonard Göke: How time-series reduction impacts storage modelling
- 21. und 22. Juni 2021: Bei der Pre-EAERE Konferenz wurde am der Workshop “Beyond Coal - Designing Coal Phase-outs Across the Globe” organisiert. Bei der Session zu “Theoretical and conceptual frameworks for the analysis of political economy of coal phase-out and on energy transitions” nahm unter anderem Hanna Brauers für die TU Berlin an der Expert*innen-Paneldiskussion teil. Bei der Session “Case studies on coal transitions – drivers, barriers, and socio-economic implication. Analysis of politically and economically viable coal phase-out pathways, and possible synergies in the wake of post-pandemic recovery efforts” trug Isabell Braunger für die TU Berlin Forschungsergebnisse für Deutschland vor.
 - 29. September 2021: Abschlussworkshop, online: Projekt-Abschlussworkshop mit folgenden Vorträgen der Projektpartner und einer Podiumsdiskussion:
 - Christian Hauenstein: "Advancing climate policy with collaborative governance? Lessons from the German 'Coal Commission'"
 - Karlo Hainsch: "Transitioning Europe and Germany to 100% renewable energy"
 - Paula Walk: "Opportunities and challenges for structural change in Lusatia"
 - Wolf-Peter Schill: "Electricity storage and the renewable energy transition"
 - Carlos Gaete-Morales: "Power sector effects of battery electric vehicles in scenarios with fossil fuel phase out"
 - Martin Kittel: "Renewable Energy Targets and Unintended Storage Cycling: Implications for Energy Modeling"
 - Wolf-Peter Schill: "Overview of other FFF project results generated at DIW Berlin"
 - Sebastian Osorio & Michael Pahle: "Fit for 55: Challenges towards a more ambitious EU-ETS and its impact on the power sector"

- Die Podiumsdiskussion „Nach der Bundestagswahl: Wie geht es weiter mit der Klima- und Energiepolitik in Deutschland?“ fand statt mit Prof. Dr. Claudia Kemfert (DIW Berlin), Barbara Metz (Deutsche Umwelthilfe), Carla Reemtsma (Fridays for Future), Dr. Kurt-Christian Scheel (Verband der Automobilindustrie), Tilman Schwencke (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) und wurde moderiert von Prof. Dr. Pao-Yu Oei (Europa Universität Flensburg, TU Berlin)
- Die Vorträge sind online einzusehen: https://www.diw.de/de/diw_01.c.825543.de/veranstaltungen/abschlussworkshop_bmbf_forschungsprojekt_fossil_fuels_in_the_wake_of_greenhouse_gas_neutrality_fff.html.

Alle Workshops wurden vom Fachpublikum gut besucht und angenommen.

Weitere Veranstaltungen, bei denen Projektergebnisse disseminiert, bzw. auch generiert wurden waren insbesondere die folgenden:

2019

- 23.-26. Juni 2019: Bei der 30th European Conference on Operational Research (EURO2019) in Dublin hielt Alexander Zerrahn den Vortrag "Prices in Power System Models".
- 8. und 9. Oktober 2019: Prof. Dr. Pao-Yu Oei hat Zwischenergebnisse aus AP2 bei der ENERGY MODELLING PLATFORM FOR EUROPE (EMP-E) Konferenz 2019 in Brüssel zum Thema „Modelling the implementation of A Clean Planet For All Strategy“ vorgestellt.
- 15. Oktober 2019: Prof. Dr. von Hirschhausen hat bei der Stakeholderveranstaltung "Facilitating deep decarbonisation - the example of the gas sector transition" in Brüssel organisiert von E3G und der European Climate Foundation, teilgenommen und Zwischenergebnisse des Projekts vorgestellt.
- 16. und 17. Oktober 2019: Prof. Dr. Pao-Yu Oei war für einen Vortrag zum Thema „German coal phase out agreement – and how that relates to their energy transition plans and policies“ beim International Research Network for Low Carbon Societies - LCS-RNet 11th Annual Meeting in Rom eingeladen.
- Im Herbst 2019 wurde in der Tschechischen Republik auch eine Kohlekommission eingerichtet, die sich z.T. am Beispiel Deutschlands orientiert. Seitdem stand das Konsortium in engem Austausch mit einigen der Kommissionsmitglieder, um Erfahrungen aus Deutschland zur Verfügung zu stellen.

2020

- 27. und 28. Januar 2020: In Polen fand ein Stakeholderworkshop statt, an dem eine Vielzahl an Teilnehmenden aus dem polnischen Energiesektor, politischen Entscheidungsträger*innen sowie Zivilgesellschaft zusammenkam. Organisiert von der europäischen Kommission und dem Marschall der Schlesischen Woiwodschaft fand die Veranstaltung „Towards a Green Economy – exchange of experiences of European Coal Regions“ statt. Thematisch hat sich die Veranstaltung durch den Fokus auf Kohlebergbau Regionen und eine durch den Klimaschutz beschleunigte Transition weg von der Kohle sehr gut für unsere Forschung geeignet. Die hochrangig besetzte Veranstaltung diente dem Erkenntnisgewinn zur aktuellen Situation in Polen.

- Prof. Dr. Pao-Yu Oei hat Zwischenergebnisse auf einem online Webinar zu Erfahrungen mit Strukturwandel und Kohleausstieg am 09.06.2020 <https://www.agora-energiewende.de/en/events/germanys-long-goodbye-from-coal/>, bei einer Anhörung im Sächsischen Landtag zur Umsetzung des Kohleausstiegs in der Lausitz/Sachsen am 30.06.2020 und bei einer Veranstaltung der UNFCCC 2020 Climate Dialogues zu den Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen am 30.11.2020 vorgestellt. Zudem konnte er ein Interview im Deutschlandfunk Nova zum European Green Deal geben: <https://www.deutschlandfunknova.de/beitrag/bericht-zu-european-green-deal-der-umstieg-auf-erneuerbare-energie-ist-moeglich-wenn-auch-teuer>.
- 15. Juni 2020: Prof. Dr. von Hirschhausen hat am bei einem Event in Brüssel - "A 100 percent renewables for a crisis proof European Green Deal" - das auf politische Entscheidungsträger*innen abzielte, Zwischenergebnisse vorstellen können.
- 26. Juni 2020: Hanna Brauers stellte auf dem Panel "Policies to Support Workers and Communities in the Transition to Clean Energy Economies in the US and the EU" der wissenschaftlichen Konferenz EAERE Zwischenergebnisse vor. <https://www.youtube.com/watch?v=SWIk61vIvGI&list=PLlvzGEWUVw4hmLBU5YKWXFBhbgVABjqxh&index=11&t=0s>.
- 29. Juni 2020: Sebastian Osorio stellte "Increasing the stringency of the EU ETS to achieve more ambitious climate targets" auf der wissenschaftlichen Konferenz EAERE Zwischenergebnisse vor.
- 27.-30. September 2020: Alexander Roth stellte die Zwischenergebnisse der Arbeit „External Costs of Electricity Transmission Infrastructure: Evidence from Well-being Data“ auf der Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik vor.
- 6.-8. Oktober 2020: Das DIW-Team stellte ein kurzes einführendes Video zur methodischen Weiterentwicklung des Modells DIETERpy bei der EMP-E-Online-Konferenz vor (<https://youtu.be/n7L0i5Dc5fM>).
- 14. Oktober 2020: Hanna Brauers stellte in einem IPPR Podcast und Blog Eintrag („A just transition? Lusatia, lignite and lessons learned“; <http://wawe.link/IPPR-EJP/episodes>) Forschungsergebnisse vor, die jetzt für eine breitere internationale Öffentlichkeit zur Verfügung stehen.
- 20. November 2020: Martin Kittel stellte Zwischenergebnisse zum Phänomen der unbeabsichtigten Speicherverluste in Energiemodellen beim PhD-Seminar „Economics of Climate Change“ des Dialogs zur Klimaökonomie vor.
- 08.-10. Dezember 2020: Alexander Roth stellte die Zwischenergebnisse der Arbeit „External Costs of Electricity Transmission Infrastructure: Evidence from Well-being Data“ beim DIW Graduate Center Winter Workshop vor.
- 08.-10. Dezember 2020: Ebenfalls beim DIW Graduate Center Winter Workshop hielt Martin Kittel den Vortrag „Renewable Energy Targets and The Storage Cycling Trap: Unintended Effects and Implications for Power Sector Modeling“.

2021

- 16. März 2021: Martin Kittel hielt den Vortrag "Renewable Energy Targets and the Storage Cycling Trap: Unintended Effects and Implications for Power Sector Modeling" bei der 15th International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2021 (Online).
- 09. April 2021: Martin Kittel hielt den Vortrag "Renewable Energy Targets and the Storage Cycling Trap: Unintended Effects and Implications for Power Sector Modeling" bei der 15th Conference on Energy Economics and Technology - ENERDAY (Online).
- 09. April 2021: Ebenfalls bei der ENERDY-Konferenz hielt Carlos Gaete den Vortrag „Battery Electric Vehicles: Open-source Modeling of Time Series Data and Their Application in Power Systems Models“
- 18.-20. Mai 2021: Beim digitalen Jahrestreffen 2021 des Forschungsnetzwerks Energiesystemanalyse hielt Wolf-Peter Schill einen Video-Poster-Vortrag „DIETERpy: A Python Framework for The Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables“
- 03. Juni 2021: Martin Kittel hielt den Vortrag "Renewable Energy Targets and The Storage Cycling Trap: Unintended Effects and Implications for Power Sector Modeling" beim Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES) (Online).
- 07.-09. Juni 2021: Martin Kittel hielt bei der 1st IAEE Online Conference den Vortrag "Renewable Energy Targets and the Storage Cycling Trap: Unintended Effects and Implications for Power Sector Modeling".
- 07.-09. Juni 2021: Ebenfalls bei der IAEE Online Conference hielt Carlos Gaete den Vortrag „Battery Electric Vehicles: Open-source Modeling of Time Series Data and Their Application in Power Systems Models“
- 9.-11. Juni 2021: Martin Kittel hielt beim DIW Berlin Graduate Center 2021 Summer Workshop den Vortrag „Renewable Energy Targets and Unintended Storage Cycling: Implications for Energy Modeling“.
- 14. Juni 2021: Sebastian Osorio stellte "Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector" auf der wissenschaftlichen Konferenz International Energy Workshop (IEW) Zwischenergebnisse vor.
- 25. Juni 2021: Hanna Brauers präsentierte bei der Policy Session der 26. wissenschaftlichen Konferenz EAERE zu "Lessons for just transition processes from phasing out coal in Germany".
- 08. Juli 2021: Hanna Brauers war beim workshop "A fair transition for 2050: tapping into a century of ideas on the role of governance and collaboration" des European Policy Centre Forschungsergebnisse zu Deutschland.
- 21.-25. Juni 2021: Ebenfalls auf der EAERE-Konferenz hielt Martin Kittel den Vortrag „Renewable Energy Targets and the Storage Cycling Trap: Unintended Effects and Implications for Power Sector Modeling“.
- 21.-25. Juni 2021: Ebenfalls auf der EAERE-Konferenz hielt Wolf-Peter Schill den Vortrag „The Economics of Variable Renewables and Electricity Storage“.
- 26.-29. September 2021: Wolf-Peter Schill hielt bei der Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik 2021 (Online) den Vortrag „The Economics of Variable Renewables and Electricity Storage“.
- 11.-12. November 2021: Nach Ende der Projektlaufzeit stellte Wolf-Peter Schill aggregierte Ergebnisse aus AP 4 in einer eingeladenen Keynote „Flexibility in the Electricity Sector through Storage and Sector Coupling: Insights from Numerical Modeling“ bei der Trans-Atlantic Infraday Conference 2021 vor.

Zwischenergebnisse wurden außerdem bereits öffentlich in folgenden Zeitungsartikeln bzw. Interviews erwähnt:

- Zeitungsartikel in der Süddeutschen Zeitung: „Mit Subventionen sollen in Deutschland Terminals für Flüssiggas entstehen. Doch die CO₂-Bilanz ist schlecht. Kritiker fordern, das Geld lieber in erneuerbare Energien zu investieren“, verfasst von Alicia Prager.
- Interview: Flüssiggas – (k)eine Brücke zum Klimaschutz: Wie sinnvoll und nötig sind die in Deutschland geplanten LNG-Terminals?; <https://www.scinexx.de/news/energie/interview-fluessiggas-keine-bruecke-zum-klimaschutz/>
- Interview: Erdgas und Klimaschutz – ein Widerspruch: Hanna Brauers und Isabell Braunger über den Bau von vier Terminals für den fossilen Energieträger in Deutschland; https://www.pressestelle.tu-berlin.de/menue/tub_medien/newsportal/forschungs_news/2019/erdgas_und_klimaschutz_ein_widerspruch/

Die Forschungsergebnisse wurden außerdem wie vorgesehen in einer Projektbroschüre veröffentlicht:

Brauers, Hanna, Philipp Herpich, Pao-Yu Oei, and Sebastian Osorio. 2021. 'The Future of Fossil Fuels: Pathways to Climate Neutrality in Germany and Europe'. <https://cloud.wiptuberlin.de/index.php/s/FCMPjnbqrgxXNqc>.

Diese Broschüre stellt das Projekt vor und fasst die Ergebnisse in verständlicher Sprache für eine breitere Öffentlichkeit zusammen.

5.6. AP6: Synthese und politische Empfehlungen

Wie bereits in Abschnitt 2.1.6 beschrieben stellte es sich im Projektablauf zur Vermeidung von Dopplungen als effizient dar, AP 6 als eine Art virtuelles Arbeitspaket zu betrachten, bzw. als Bestandteil von AP 5. Dementsprechend wird hier auch grundsätzlich auf die Beschreibung der Ergebnisse des AP 5 in Abschnitt 5.5 verwiesen.

Ursprünglich geplant war, einen separaten policy brief für jede der Arbeitspakete 2, 3 und 4 zu erstellen. Dies stellte sich jedoch aufgrund der großen Breite der in jedem AP durchgeführten Arbeiten als nicht zielführend dar. Stattdessen wurden in allen drei Arbeitspaketen bereits spezifische, politikrelevante Inhalte generiert, vgl. die Beschreibungen der Ergebnisse der AP 2-4 sowie des AP 5 in den vorigen Abschnitten.

Zusätzlich wurde im Konsortium vereinbart, ergänzend je Institution noch einen Blogartikel zu veröffentlichen. Für die TU Berlin geschah dies in Form des Beitrags "EnergieWinde: Reportagen und Hintergründe aus der Welt der grünen Energie", wo Forschungsergebnisse über das deutsche Kohleausstiegsgesetz für eine breite Öffentlichkeit diskutiert wurden (<https://energiewinde.orsted.de/energiepolitik/kohleausstieg-kommentar-pao-yu-eoi-catharina-rieve>). Für das PIK geschah dies durch den Blogbeitrag „If Buildings Renovation fails, the EU ETS pricing mechanism must change“, der mögliche Änderungen im Preismechanismus

des ETS diskutiert für den Fall, dass energetischen Sanierungen im Gebäudebestand nicht wie vorgesehen erreicht werden (<https://energypost.eu/if-buildings-renovation-fails-the-eu-ets-pricing-mechanism-must-be-changed/>). Am DIW Berlin wurde ein Online-Beitrag zu Wasserstoff als einer aktuell stark diskutierten Sektorkopplungs- sowie Flexibilitätstechnologie erstellt, der die Rolle von Wasserstoff für die Energiewende in verschiedenen Sektoren einordnet (<https://www.heise.de/hintergrund/Gruener-Wasserstoff-in-der-Energiewende-Fokussierter-Einsatz-unverzichtbar-6193503.html>).

6. Ausgabenübersicht

6.1. Technische Universität Berlin

	Position Gesamtfinanzierungsplan	Budget	Ausgaben
812	Personalausgaben wiss. Mitarbeiter	157.032,00	149.860,97
822	Personalausgaben stud. Hilfskräfte	40.826,16	35.495,87
835	Vergabe von Aufträgen, Werkverträge	6.000,00	12.313,87
843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	15.200,00	8.733,48
846	Dienstreisen	13.129,00	5.565,74
850	Gegenstände und andere Investitionen von mehr als 410 / 400 Euro im Einzelfall	1.400,00	1.380,00
	Summen	233.587,16	213.349,93
	<i>Differenz</i>		<i>20.237,23</i>

6.2. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

	Position Gesamtfinanzierungsplan	Budget	Ausgaben
812	Personalausgaben wiss. Mitarbeiter	157.914,55	174.200,69
822	Personalausgaben stud. Hilfskräfte	13.200,00	8,921,56
843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	37.111,46	18.752,23
846	Dienstreisen	5.790,00	1.625,28
850	Gegenstände und andere Investitionen von mehr als 410 / 400 Euro im Einzelfall	0,00	0,00
	Summen	214.016,01	203.499,76
	<i>Differenz</i>		<i>10.516,25</i>

6.3. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

	Position Gesamtfinanzierungsplan	Budget	Ausgaben
812	Personalausgaben wiss. Mitarbeiter	149.285,24	148.431,77
822	Personalausgaben stud. Hilfskräfte	8.916,00	10.279,89
835	Vergabe von Aufträgen, Werkverträge	0,00	0,00
843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	18.820,12	19.155,57
846	Dienstreisen	4.314,00	461,39
850	Gegenstände und andere Investitionen von mehr als 410 / 400 Euro im Einzelfall	0,00	0,00
	Summen	181.335,36	178.335,36
	<i>Differenz</i>		<i>3.000,00</i>

7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

7.1. Technische Universität Berlin

Die im Projekt bearbeiteten Forschungsfragen erforderten umfassende Modellierungsarbeiten und qualitative Analysen (AP2), die zur Beantwortung der Fragen notwendig und angemessen waren. Die Basis der Modellierungsarbeiten im Projekt bildete die gemeinsame Problemdefinition und Entwicklung eines gemeinsamen Rahmens (AP1). Es wurden diverse Workshops und Konferenzen genutzt (vgl. Abschnitte 5.5), um (Zwischen-)Ergebnisse anhand von Präsentationen, Papieren etc. zu präsentieren, was zwar aufgrund von Vor- und Nachbereitungen eine Inanspruchnahme weiterer zeitlichen Ressourcen verursachte, welche sich jedoch wiederum in einer Steigerung der Qualität der Projektergebnisse niederschlug.

7.2. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Die im Projekt behandelten Forschungsfragen erforderten umfangreiche Modellierungsarbeiten (AP3), die zur Beantwortung der Fragen notwendig und angemessen waren. Die Grundlage unserer Ergebnisse war der gemeinsame Rahmen für die Szenarioanalyse (vgl. Abschnitt 1.2). Die dynamische europäische Klimapolitik erforderte jedoch eine ständige Aktualisierung des Modells sowie eine Anpassung unserer Papiere, um

die wichtigsten politischen Fragen zeitnah anzugehen. Verschiedene Workshops, Veranstaltungen und Konferenzen wurden genutzt (vgl. Abschnitt 5.5), um (Zwischen-) Ergebnisse in Form von Präsentationen, Vorträgen etc. vorzustellen, was zwar zusätzliche zeitliche Ressourcen durch Vor- und Nachbereitung erforderte, aber die Qualität der Projektergebnisse steigerte.

7.3. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

Die im Projekt behandelten Forschungsfragen erforderten umfangreiche Modellierungsarbeiten (AP4), die zur Beantwortung der Fragen notwendig und angemessen waren. Das im Projekt weiterentwickelte Modell DIETER steht nun in verschiedenen Versionen quelloffen und ohne Zugangsbarriere zur Verfügung und ist somit – unabhängig von den numerischen Analysen – auch ein eigenständiger Projektoutput. Insgesamt war das Projekt für das DIW Berlin mit vier peer-reviewten Veröffentlichungen und fünf weiteren Fachartikeln, die sich zum Ende der Projektlaufzeit in unterschiedlichen Stadien des Review- bzw. Veröffentlichungsprozesses befanden, deutlich überdurchschnittlich ertragreich.

8. Nutzen der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse konnten erfolgreich in rund 25 Artikeln, überwiegend in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, veröffentlicht werden, oder befanden sich zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichts im Veröffentlichungsprozess. Dadurch stehen sie der interessierten Fachöffentlichkeit zur weiteren Nutzung zur Verfügung. Die vollständige Liste der Veröffentlichungen ist in Abschnitt 9 zu finden.

Des Weiteren wurden die Projektergebnisse auf diversen öffentlichen Projektworkshops vorgestellt sowie auf zahlreichen Konferenzen und Workshops präsentiert (vgl. Abschnitt 5.5). Die Projektergebnisse wurden in der Fachwelt und der Praxis gut wahrgenommen, wie mehrere Inputvorträge und Keynotes zeigen.

Durch die diversen Publikationen und dem großen Austausch mit einer vielfältigen Auswahl an Stakeholdern bietet sich eine große Anschlussfähigkeit und eine gute Grundlage für weitere Projekte.

Alle im Projekt erarbeiteten Versionen des Modells DIETER wurden wie geplant quelloffen der Allgemeinheit ohne Zugangsbarrieren zur Verfügung gestellt und können durch die Community genutzt werden (https://gitlab.com/diw-evu/dieter_public). Eine Online-Dokumentation wurde ebenfalls zur Verfügung gestellt (https://diw-evu.gitlab.io/dieter_public/dieterpy/). LIMES-EU ist derzeit noch kein Open-Source-Modell. Wir arbeiten aber bereits daran, dies zu ändern. Im Moment ist das Modell detailliert dokumentiert, einschließlich aller Ergänzungen und Erweiterungen, die im Rahmen dieses Projekts vorgenommen wurden.

Die Ergebnisse des Projektes fanden Eingang in die Dissertationsvorhaben mehrerer Projektmitarbeiter und dienen somit der Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Auch in die Lehre der beteiligten Institutionen fanden die Modelle und Publikationen Eingang.

9. Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Projektergebnisse wurden in den folgenden Artikeln veröffentlicht werden oder befinden sich zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichts im Veröffentlichungsprozess.

9.1. 2019

- Löffler, Konstantin, Thorsten Burandt, Karlo Hainsch, und Pao-Yu Oei. 2019. „Modeling the Low-Carbon Transition of the European Energy System - A Quantitative Assessment of the Stranded Assets Problem“. Energy Strategy Reviews 26 (November). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100422>.
- Bartholdsen, Hans-Karl, Anna Eidens, Konstantin Löffler, Frederik Seehaus, Felix Wejda, Thorsten Burandt, Pao-Yu Oei, Claudia Kemfert, und Christian von Hirschhausen. 2019. „Pathways for Germany's Low-Carbon Energy Transformation Towards 2050“. Energies 12 (15): 2988. <https://doi.org/10.3390/en12152988>.
- Fitzgerald, L. M., Braunger, I. and Brauers, H. 2019. Destabilisation of Sustainable Energy Transformations: Analysing Natural Gas Lock-in in the case of Germany, STEPS Working Paper 106, Brighton: IDS https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/bitstream/handle/20.500.12413/14499/WP_106_Fitzgerald_et_al.%20FINAL_Jan_2020.pdf?sequence=108&isAllowed=y.

9.2. 2020

- Brauers, Hanna, Pao-Yu Oei, and Paula Walk. 2020. 'Comparing Coal Phase-out Pathways: The United Kingdom's and Germany's Diverging Transitions'. Environmental Innovation and Societal Transitions 37 (December): 238-53. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.09.001>.
- Brauers, Hanna, and Pao-Yu Oei. 2020. 'The Political Economy of Coal in Poland: Drivers and Barriers for a Shift Away from Fossil Fuels'. Energy Policy 144 (September): 111621. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111621>.
- Oei, Pao-Yu. 2020. Germany's Coal Exit Law: Too Late and Too Expansive. Baltic Rim Economies Review, no. 4 (December): 27, <https://sites.utu.fi/bre/germanys-coal-exit-law-too-late-and-too-expansive/>.
- Kriegler, E., Gulde, R., Colell, A., von Hirschhausen, C., Minx, J. C., Oei, P.-Y., Yanguas-Parra, P., Bauer, N., Brauers, H., Broska, L. H., Groh, E., Hagen, A., Hainsch, K., Holz, F., Hübler, M., Jakob, M., Khabbazan, M. M., Leimbach, M., Manych, N., Montes de Oca León, M., Ohlendorf, N., Osorio, S., Pahle, M., Reutter, L., Shamon, H., Steckel, J., Strefler, J., Vance, C., Vögele, S., von Wangenheim, G., Walk, P., Wittenberg, I., Zundel, S. 2020. 'Ausstieg aus fossilen Energieträgern - wie gelingt eine faire Systemtransformation', (Dialog zur Klimaökonomie: Hintergrundpapier zum 7. Forum Klimaökonomie), Potsdam : Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (u.a.), 43 p. <https://doi.org/10.2312/pik.2020.004>.
- Pahle, M., Tietjen, O., Osorio, S., Knopf, B., Flachsland, C., Korkmaz, P., Fahl, U., 2020. 'Die Anschärfung der EU-2030-Klimaziele und Implikationen für Deutschland'. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 70, 10–13.

- Schill, W.-P., 2020. 'Electricity storage and the renewable energy transition'. Joule 4(10), 2059-2064. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.022>

9.3. 2021

- Brauers, Hanna, Isabell Braunger, and Jessica Jewell. 2021. 'Liquefied Natural Gas Expansion Plans in Germany: The Risk of Gas Lock-in under Energy Transitions'. Energy Research & Social Science 76 (June): 102059. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102059>.
- Brauers, Hanna, Philipp Herpich, Pao-Yu Oei, and Sebastian Osorio. 2021. 'The Future of Fossil Fuels: Pathways to Climate Neutrality in Germany and Europe'. <https://cloud.wiptuberlin.de/index.php/s/FCMPjnbqrgxXNqc>.
- Osorio, S., Tietjen, O., Pahle, M., Pietzcker, R.C., Edenhofer, O., 2021. 'Reviewing the Market Stability Reserve in light of more ambitious EU ETS emission targets'. Energy Policy 158, 112530. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112530>
- Pietzcker, R.C., Osorio, S., Rodrigues, R., 2021. 'Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector'. Appl. Energy 293, 116914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116914>
- López Prol, J., Schill, W.-P., 2021. 'The Economics of Variable Renewables and Electricity Storage'. Annual Review of Resource Economics 13(1), 443-467. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-101620-081246>
- Gaete-Morales, C., Kittel, M., Roth, A., Schill, W.-P., 2021. 'DIETERpy: a Python framework for The Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables'. SoftwareX 15, 100784. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100784>

9.4. 2022

- Pahle, M., Tietjen, O., Osorio, S., Egli, F., Steffen, B., Schmidt, T.S., Edenhofer, O., 2022. 'Safeguarding the energy transition against political backlash to carbon markets'. Nat Energy 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-00984-0>
- Osorio, S., Pahle, M., Ruhnau, O., 2022. 'If Buildings Renovation fails, the EU ETS pricing mechanism must change'. Energy Post. URL <https://energypost.eu/if-buildings-renovation-fails-the-eu-ets-pricing-mechanism-must-be-changed/>.
- Kittel, M., Schill, W.-P., 2022. 'Renewable Energy Targets and Unintended Storage Cycling: Implications for Energy Modeling'. iScience, 104002. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104002>
- Brauers, H., 2022: 'Natural Gas as a Barrier to Sustainability Transitions? A Systematic Mapping of the Risks and Challenges'. Energy Research & Social Science 89 (July): 102538. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102538>.

9.5. Im Veröffentlichungsprozess bzw. noch unveröffentlicht

- Stöckl, F., Zerrahn, A. 'Substituting Clean for Dirty Energy: A Bottom-Up Analysis'. DIW Discussion Paper 1885.
https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.795779.de/dp1885.pdf
- Krekel, C., Rechlitz, J., Rode, J., Zerrahn, A. 'Quantifying the Externalities of Renewable Energy Plants Using Wellbeing Data: The Case of Biogas'. SOEP Paper 1116.
https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.809799.de/diw_sp1116.pdf
- Roth, A., Sarmiento, L., Zaklan, A., Zerrahn, A. 'External Costs of Electricity Transmission Infrastructure: Evidence from Well-being Data'. *Mimeo*.
- Kittel, M., Schill, W.-P., Zerrahn, A. 'Prices in power sector models'. *Mimeo*.
- Gaete-Morales, C., Schill, W.-P. 'Power sector effects of battery-electric vehicles and variable renewables: flexibility versus demand'. *Mimeo*.

Kurzer inhaltlicher Bericht

Projekt "Future of Fossil Fuels in the wake of greenhouse gas neutrality" (FFF)

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Berlin Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung	Förderkennzeichen: 01LA1810A 01LA1810B 01LA1810C
---	---

Vorhabenbezeichnung:
Future of Fossil Fuels in the wake of greenhouse gas neutrality (FFF) - Die Zukunft fossiler Energieträger im Zuge von Treibhausgasneutralität (FFF)

Laufzeit des Vorhabens:
10/2018 – 09/2021

Autor*innen:
von Hirschhausen, Christian; Oei, Pao-Yu; Brauers, Hanna; Schill, Wolf-Peter; Pahle, Michael; Osorio, Sebastian

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Kurzer inhaltlicher Bericht des Verbundprojektes FFF

Verschiedene aktuelle Szenarien zeigen, dass ein weltweiter Ausstieg aus der Kohle in den nächsten Jahrzehnten der Schlüssel zum Erreichen von Treibhausgasneutralität ist. Dies bedeutet, dass bestehende Bergwerke und Kraftwerke teils lange vor dem Ende ihrer erwarteten technischen Lebensdauer stillgelegt werden müssen. Gleichzeitig ist eine rasche Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der internationalen Klimaziele, da die Emissionsminderung in anderen Sektoren schwieriger zu bewerkstelligen ist und möglicherweise längere Umstellungszeiten erfordert. Darüber hinaus ermöglicht sie eine tiefgreifende Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Mobilität durch Elektrifizierung (Sektorenkopplung).

Ziel dieses Vorhabens war es, bisher zu wenig erforschte Aspekte der Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors im europäischen Kontext zu untersuchen und konkrete politische Instrumente sowohl auf deutscher als auch auf europäischer Ebene zu bewerten; dies bezieht sich insbesondere auf Kohle, aber auch auf andere fossile Brennstoffe, insbesondere Erdgas. Verschiedenen ökonomische und technische sowie soziale und politische Herausforderungen des anstehenden Ausstiegs aus den fossilen Energieträgern wurden deshalb im Projekt untersucht. Die Innovation des Forschungsansatzes bestand in der Zusammenführung von verschiedenen methodischen Ansätzen der Forschung (numerische Modellierung, Theorie, Ökonometrie, Institutionenökonomik/politische Ökonomik) mit praktischen Fragen der politischen Ausgestaltung unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Praxispartnern mit einem Fokus auf den nationalen Kontext und der europäischen Ebene.

In Bezug auf den Kohleausstieg hat sich die vorherrschende Frage in der EU in den letzten zehn Jahren von "ob?" zu "wann?" und "wie?" verschoben. Dagegen scheint die Rolle von Erdgas und Erdöl als Energieträger noch offener zu sein. Im Projekt wird deshalb insbesondere die Verflechtung zwischen EU- und nationalen Maßnahmen im Elektrizitätssektor berücksichtigt, da dieser die Grundlage für die künftige Integration mit Sektoren wie der Wärmeversorgung von Haushalten und Industrie sowie dem Verkehr bildet. Aspekte der Kopplung dieser Sektoren und der verstärkten Interaktion mit dem Elektrizitätssektor werden aus einer Top-down-Perspektive mit einem Energiesystemmodell analysiert, das durch verschiedene detaillierte Analysen ergänzt wird, insbesondere die Interaktion des Elektrizitätssektors mit dem Verkehr, den ETS-Industriesektoren, Wärme- und Kälteanwendungen sowie den Anwendungen von Technologien, die Biomasse und Kohlenstoffabscheidung, -transport und -lagerung (CCTS) nutzen.

Die wichtigsten Ergebnisse in diesem Projekt sind:

- Die Untersuchung möglicher kurzfristiger Investitionen in fossile Brennstoffe trotz der Klimaziele in Europa zeigt, dass dies zu hohen Mengen an stranded assets führen würde. Kapazitäten im Gesamtwert von bis zu 200 Mrd. €, was einer Gesamtkapazität von 260 GW entspricht, könnten bis 2035 gestrandet sein. Wichtig ist, dass dieser Betrag bis zu 75 % reduziert werden, wenn Entscheidungsträger*innen stattdessen in

erneuerbare Energien investieren. Der Vergleich der Kohlesysteme Deutschlands, des Vereinigten Königreichs und Polen zeigt unter anderem, wie wichtig es ist, die Subventionen für alle fossilen Brennstoffe zu beenden, um einen rechtzeitigen Ausstieg zu ermöglichen. Geeignete politische Maßnahmen, die sowohl die Treiber als auch die Hindernisse eines fossilen Ausstiegs direkt adressieren, können dazu beitragen die Dekarbonisierung zu beschleunigen und gleichzeitig einen gerechten Übergang für Beschäftigte und Regionen zu ermöglichen. Das Projekt verdeutlicht außerdem das bisher oft übersehene übersehenen Lock-in-Potenzial von Erdgas und die damit verbundenen Emissionen, die die Energiewende erschweren und verlangsamen könnten.

- Wie interagieren nationale Pfade für den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen mit der europäischen Klimapolitik? Selbst wenn die Ausstiegspläne ausreichend umgesetzt werden, könnten sie, da der Energiesektor in das Emissionshandelssystem (EU ETS) eingebettet ist, zu Carbon Leakage führen. Um dies zu vermeiden, sollte das EU-Emissionshandelssystem gestärkt werden. Unsere Ergebnisse zeigen, dass bei ehrgeizigeren EU-Zielen im Einklang mit dem "Fit for 55"-Paket die Kohle - (bis 2030) und erdgasbasierte Stromerzeugung (bis 2035) aufgrund hoher CO₂-Preise auslaufen wird. Außerordentlich hohe CO₂-Preise könnten jedoch nach hinten losgehen. Daher sollten Alternativen zur Entlastung der ETS- und Nicht-ETS-Sektoren vorgesehen werden. Um die Energiewende zu sichern, sollte zudem das Investitionsrisiko für erneuerbare Energien verringert werden, und ein preisorientierter Mechanismus sollte anstelle der Marktstabilitätsreserve (MSR) in Betracht gezogen werden.
- Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe und eine entsprechend deutlich verstärkte Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energien erhöht die Nachfrage nach zeitlicher Flexibilität im Stromsystem stark. Insbesondere der Bedarf an Langfrist-Stromspeichern steigt bei sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien überproportional. Die zunehmende Sektorenkopplung kann bei entsprechender Ausgestaltung jedoch zusätzliche Flexibilität bereitstellen, vor allem für die Aufnahme ansonsten kaum verwendbarer Stromüberschüsse aus Wind- und Solarenergie. Elektrofahrzeuge können mit Hilfe einer Rückspeisung in das Stromsystem (Vehicle-to-Grid) darüber hinaus einen weiteren Flexibilitätsbeitrag leisten, der auch den Stromspeicherbedarf entlasten kann.

Anwendungsmöglichkeiten des Projekts sind die Umsetzung der folgenden politischen Empfehlungen:

- **Maßnahmen für eine schnelle Dekarbonisierung sollten nicht länger aufgeschoben werden:** Für alle EU-Länder besteht der Bedarf an sofortigen weiteren Klimaschutzmaßnahmen. Insbesondere um zusätzliche gestrandete Investitionen zu vermeiden sollten sich neue Investitionen auf Erneuerbare Energien konzentrieren und nicht auf Erdgas.
- **Rascher Ausstieg aus fossilen Energieträgern in Deutschland und Europa:** Die EU und Deutschland müssen bis spätestens 2030 aus der Kohle und bis 2035 aus Erdgas

aussteigen, um einen Beitrag zum Ziel zu leisten, die globale Erwärmung unter 1,5/2°C zu halten. Länder wie Deutschland und Polen müssen ihre Kohleausstiegstermine vorverlegen und die Reduzierung des Erdgasverbrauchs planen.

- **Mehr in erneuerbare Energien und Energieeffizienz investieren:** Sie sind der einzige bewährte und zuverlässige Weg zur Dekarbonisierung des Energiesystems. Investitionen in erneuerbare Energien können die Abhängigkeit von riskanten und teuren Technologien wie noch nicht verfügbare Negative-Emissions-Technologien oder Kernenergie reduzieren.
- **Beendigung der Subventionen für fossile Brennstoffe:** Gleichzeitig mit Investitionen in erneuerbare Energien müssen die europäischen Regierungen ihre öffentlichen Subventionen für Erdgas und Kohle einstellen.
- **Vermeidung zusätzlicher Investitionen in die Infrastruktur für fossile Brennstoffe (insbesondere Erdgas):** Mit Erdgas lassen sich die Klimaneutralitätsziele der EU nicht erreichen, vor allem wegen der hohen Methanemissionen bei Produktion und Transport sowie der CO₂-Emissionen bei der Verbrennung. Wenn man die Klimaziele ernst nimmt, haben diese Investitionen keine Zeit, sich zu refinanzieren und werden als "stranded assets" enden.
- **Unterstützung von Regionen, die von der Produktion fossiler Brennstoffe abhängig sind:** Den verbleibenden Übergang in den Regionen, die derzeit von fossilen Brennstoffen abhängig sind, müssen durch politische Programme angegangen werden. Die Regionen brauchen (finanzielle) Unterstützung, um einen gerechten und rechtzeitigen Übergang zu erreichen. Durch die Einbeziehung lokaler Interessengruppen in die Gestaltung und Entscheidung über solche Programme, kann die Akzeptanz für den Übergangsprozess erhöht werden und lokales Wissen kann die Strategien für ein dekarbonisiertes Europa verbessern.
- **Sektorenkopplung flexibel gestalten:** Die Kopplung des Stromsektors mit den Wärme- und Verkehrssektoren muss so ausgestaltet werden, dass die neuen Lasten eine möglichst hohe zeitliche Flexibilität mit sich bringen und so zur effizienten Systemintegration der fluktuierenden erneuerbaren Energien beitragen können. Dies erfordert Investitionen in entsprechende Energiespeicher sowie eine optimierte leistungsseitige Auslegung der Anlagen der Sektorenkopplung. Dies muss durch möglichst unverzerrende Abgaben- und Tarifstrukturen unterstützt werden.