

Ariadne-Analyse

Optimale Zuteilung des CO₂-Budgets der EU: Eine Multi-Modell-Bewertung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**

Die Zukunft unserer Energie

Autorinnen und Autoren



» Dr. Jan Abrell
ZEW - Leibniz-Zentrum für
Europäische Wirtschaftsforschung



» Süheyb Bilici
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung



» Prof. Dr. Markus Blesl
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung



» Dr. Ulrich Fahl
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung



» Felix Kattelmann
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung



» Lena Kittel
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung



» Dr. Mirjam Kosch
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung



» Prof. Dr. Gunnar Luderer
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung



» Drin Marmullaku
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung



» Dr. Michael Pahle
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung



» Dr. Robert Pietzcker
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung



» Dr. Renato Rodrigues
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung



» Jonathan Siegle
Universität Stuttgart – Institut für
Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung

Herausgegeben von
Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Juni 2022

Dieses Papier zitieren:

Jan Abrell, Süheyb Bilici, Markus Blesl, Ulrich Fahl, Felix Kattelmann, Lena Kittel, Mirjam Kosch, Gunnar Luderer, Drin Marmullaku, Michael Pahle, Robert Pietzcker, Renato Rodrigues, Jonathan Siegle (2022): Optimale Zuteilung des CO₂-Budgets der EU: Eine Multi-Modell-Bewertung. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

Kontakt zu den Autorinnen und Autoren:
Dr. Mirjam Kosch, mirjam.kosch@pik-potsdam.de

Die vorliegende Ariadne-Analyse wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Die Analyse spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Zusammenfassung

Die EU hat sich verpflichtet, die Treibhausgasemissionen (THG) bis zum Jahr 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu senken. Eine zentrale Debatte innerhalb der EU-Institutionen betrifft derzeit die Einführung eines neuen Emissionshandelssystems für Straßenverkehr und Gebäude (EHS2) zusätzlich zum derzeitigen EU-Emissionshandelssystem (EHS). Diskutiert wird über die Aufteilung des CO₂-Budgets zwischen dem EU-EHS und den übrigen Sektoren, die unter die Lastenteilungsverordnung (engl. Effort Sharing Regulation, ESR) fallen, über die Höhe des CO₂-Preises für das EHS2 und über die Frage, ob zunächst nur gewerbliche Gebäude und Verkehrsmittel oder der gesamte Verbrauch reguliert werden sollen. In diesem Papier führen wir eine Multi-Modell-Bewertung durch, um die beiden erstgenannten Punkte zu beleuchten. Im Ergebnis zeigt sich, dass eine Umschichtung des Budgets zwischen den EU-EHS- und den ESR-Sektoren in der derzeit diskutierten Größenordnung unter dem Gesichtspunkt der wirtschaftlichen Effizienz vorteilhaft sein kann. Die Auswirkungen auf die Wohlfahrt der Volkswirtschaft sind jedoch – gegeben den derzeitigen Wissensstand bezüglich Vermeidungskosten – relativ gering. Es zeigt sich zudem, dass die CO₂-Preise, die notwendig wären, um die Emissionsziele zu erreichen, zwischen 130 und 210 €/tCO₂ im EU-EHS und zwischen 175 und 350 €/tCO₂ für die energiebezogenen ESR-Emissionen (ESR-E) liegen, wenn CO₂-Preise die einzigen Politikinstrumente sind, die zum Klimaschutz verwendet werden. Die Preise unterscheiden sich je nach Annahmen zu Technologieentwicklung und Basispfad der verschiedenen Modelle. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei einer Begrenzung des EHS2-Preises auf 50 €/tCO₂, wie vom Europäischen Parlament diskutiert, das Minderungsziel allein mit einem CO₂-Preis nicht erreicht werden kann. Die verbleibende Minderung müsste durch ergänzende Maßnahmen, wie technologische Standards oder Subventionen, erreicht werden, und die Kosten für die Verringerung durch diese Maßnahmen würden über 50 €/tCO₂ liegen. In diesem Fall würden die effektiven Kosten für die Verbrauchenden wahrscheinlich die Kosten der CO₂-Bepreisung allein übersteigen, da die Emissionen nicht dort verringert werden, wo es am günstigsten ist.

Inhalt

1. Einführung.....	1
2. Numerische Ansätze	4
2.1 Modelle.....	4
2.2 Szenarien	5
3. CO₂-Preisspannen zwischen den Modellen.....	8
4. Optimale Aufteilung des EU-CO₂-Budgets	11
5. Schlussfolgerungen	13
Literaturangaben	14
Anhang.....	16

1. Einführung

Die Europäische Union (EU) hat sich verpflichtet, die Treibhausgasemissionen (THG) bis zum Jahr 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Das sich daraus ergebende CO₂-Budget wird hauptsächlich auf zwei verschiedene Sektorkategorien aufgeteilt: Erstens regelt das EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS) die Emissionen der energieintensiven Industrien sowie aus dem Luft- und Schiffsverkehr. Es legt eine einheitliche Obergrenze für die CO₂-Emissionen in der EU fest und bestimmt das jährliche Emissionsbudget. Zweitens regeln die Lastenteilungsverordnung (engl. Effort Sharing Regulation, ESR) und Verordnung über Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. LULUCF) die übrigen Emissionen. Für diese Emissionen gibt es ein individuelles CO₂-Budget für jeden Mitgliedstaat (MS), das heißt die ESR regelt die Aufteilung des Emissionsbudgets auf die Länder. Die ESR erlaubt jedoch, dass die Mitgliedstaaten teilweise mit diesen Emissionsrechten handeln. Darüber hinaus hat die Europäische Kommission vorgeschlagen, ein neues Emissionshandelssystem für Straßenverkehr und Gebäude (EHS2) einzuführen.

Die EU muss daher entscheiden, wie das CO₂-Budget auf die einzelnen Sektoren und Mitgliedstaaten aufgeteilt werden soll. Es gibt zwei Hauptoptionen: Erstens die Ausweitung des EU-EHS auf alle Sektoren, was zu einer EU-weiten Obergrenze und einem einheitlichen europäischen CO₂-Preis führt. Damit würde die endgültige Aufteilung des festen CO₂-Budgets auf die einzelnen Sektoren, Länder und Anlagen dem Markt überlassen werden. Zweitens die Beibehaltung der derzeitigen sektoralen Geltungsbereiche und damit auch die jeweiligen CO₂-Budgets für das EU-EHS und die ESR-Sektoren.

Kurzfristig ist ein vollständiges europäisches Handelssystem politisch unwahrscheinlich. Daher muss die EU über das CO₂-Budget im Rahmen des EU-EHS beziehungsweise der ESR entscheiden. Diese Entscheidung wird sich auf die Kosten für die Erreichung der Klimaziele auswirken. Im aktuellen Vorschlag empfiehlt die Europäische Kommission, 64 % des verbleibenden Budgets für Treibhausgasemissionen bis 2030 den ESR-Sektoren und den Rest dem EU-EHS zuzuweisen. Nach dem Impact Assessment der EU-Kommission führt diese Aufteilung zu EU-EHS- und EHS2-Preisen von rund 50 €/tCO₂ für ein Szenario

mit strengen zusätzlichen Maßnahmen zur Ergänzung der CO₂-Preise (*MIX*). Für ein Szenario mit weniger strengen zusätzlichen Maßnahmen (*MIX-CP*) steigt der EHS2-Preis auf 80 €/tCO₂.

Angesichts der Vielzahl von Faktoren und Annahmen, die die optimale Budgetzuweisung und die CO₂-Preise beeinflussen, sollte eine solche Bewertung vorzugsweise auf mehreren Modellbewertungen beruhen, die ein breites Spektrum von methodischen, technologischen und verhaltensbezogenen Annahmen abdecken. Wir führen daher eine Multi-Modell-Bewertung anhand von vier verschiedenen Modellen durch, um den Vorschlag der Europäischen Kommission einzuordnen. Wir beantworten zwei Fragen. Erstens: Wie sieht die optimale Aufteilung des EU-CO₂-Budgets auf die EU-EHS- und ESR-Sektoren aus? Zweitens: Wie hoch sind die daraus resultierenden CO₂-Preise? Unsere Antworten auf diese Fragen sind keine einzelnen Zahlen, sondern eine Spanne, die die besten Schätzungen auf der Grundlage verschiedener Ansätze darstellt.

Da sich mehrere der Modelle, die zu dieser Studie beitragen, ausschließlich auf CO₂-Emissionen konzentrieren, rechnen wir den von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen THG-basierten ESR-Anteil von 64 % in einen *energiebezogenen* CO₂-basierten ESR-E-Anteil von 62-63 % um. Dies bedeutet, dass unser ESR-E-Sektor eine ziemlich große Überschneidung mit den von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen EHS2-Sektoren aufweist. Wir kommen zu dem Schluss, dass den ESR-E-Sektoren im Idealfall zwischen 60 und 70 % des gesamten CO₂-Budgets zugewiesen werden sollten. Der von der Kommission gewählte Wert von 62-63 % liegt somit am unteren Ende der optimalen Zuteilung. Unsere Bewertung zeigt jedoch auch, dass innerhalb einer Spanne von etwa 55-70 % die Aufteilung zwischen ESR-E- und EU-EHS-Anteilen die gesamte Wohlfahrt der EU nicht wesentlich beeinflusst.

Was die zweite Frage betrifft, so ergeben unsere Modelle für die vorgeschlagene Aufteilung des CO₂-Budgets EU-EHS-Preise von 130 bis 210 €/tCO₂, die erforderlich wären, um die Emissionsziele zu erreichen, wenn keine neuen zusätzlichen Maßnahmen ergriffen werden. Für die ESR-E-Sektoren wären CO₂-Preise zwischen 175 und 350 €/tCO₂ erforderlich, um die Ziele zu erreichen, wenn ein CO₂-Preis das einzige neue Instrument ist,

das zur Erreichung des Ziels eingesetzt wird. Diese Preisschätzungen hängen von der Technologieentwicklung und den Grundannahmen der verschiedenen Modelle ab. Sie liegen jedoch alle deutlich über den Schätzungen der Kommission von 50 bis 80 €/t CO₂. Wichtig ist, dass wir davon ausgehen, dass die Mitgliedstaaten mit ihren CO₂-Budgets handeln, das heißt die Länder erreichen nicht unbedingt ihre individuellen ESR-Ziele, sondern das EU-weite ESR-Ziel wird erreicht. Diese Annahme impliziert, dass der Handel mit jährlichen Emissionszertifikaten (AEA) zwischen den Mitgliedstaaten ohne Einschränkungen funktioniert. In der Praxis stößt der Handel mit AEA jedoch auf erhebliche Hindernisse, was zu heterogenen CO₂-Preisen in den Mitgliedstaaten und höheren Gesamtvermeidungskosten führt.

Unsere Ergebnisse haben zwei Implikationen für die aktuelle politische Debatte. Erstens: Wenn der EHS2-Preis, wie vom Europäischen Parlament diskutiert, bei 50 €/tCO₂ gedeckelt würde, könnte das Minderungsziel nicht allein mit einem CO₂-Preis erreicht werden. Die verbleibende Verringerung müsste durch ergänzende Maßnahmen wie technologische Standards oder Subventionen erreicht werden, und die Kosten für die Verringerung durch diese Maßnahmen würden über 50 €/tCO₂ liegen. In diesem Fall würden die effektiven Kosten für die Verbrauchenden höchstwahrscheinlich die Kosten der CO₂-Bepreisung allein übersteigen, da es keine Flexibilität gibt, die Emissionen dort zu verringern, wo es am günstigsten ist. Zweitens: Während die EU-Kommission vorgeschlagen hat, die Emissionen im Rahmen des EU-EHS um 61 % zu reduzieren, wird im EU-Parlament derzeit diskutiert, das Ziel des EU-EHS noch weiter zu verschärfen. Im Gegensatz zu unserer Analyse wird die gleichzeitige Entschärfung der ESR-Ziele im Parlament nicht diskutiert. Wir stellen jedoch fest, dass eine solche Umschichtung des Budgets aus Sicht der wirtschaftlichen Effizienz vorteilhaft sein kann. Eine Verschiebung des Budgets zwischen EU-EHS- und ESR-Sektoren in der diskutierten Bandbreite hat jedoch angesichts des derzeitigen Wissens über die Vermeidungskosten relativ geringe Auswirkungen auf die gesamte Wohlfahrt der EU.

2. Numerische Ansätze

Wir verwenden vier verschiedene Modelle, um die Kostenimplikationen der Aufteilung des EU-CO₂-Budgets zwischen dem EU-EHS und den ESR-E-Sektoren zu untersuchen. Die Modelle unterscheiden sich in mehreren Dimensionen, einschließlich des Modelltyps und der Annahmen zu technologischen Entwicklungen, Energieeffizienzpotenzialen und politischen Maßnahmen entlang des Basispfads (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2 im Anhang). Wir interpretieren diese Unterschiede als Unsicherheit über die zukünftigen Entwicklungen und zielen daher nicht darauf ab, diese Annahmen zu harmonisieren. Abgesehen von den Szenariospezifikationen und der Harmonisierung der Ergebnisgrößen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, beschränken wir die Modellharmonisierung daher auf ein Minimum.

2.1 Modelle

Wir verwenden vier verschiedene Modelle¹:

- REMIND-EU (Regional Model of Investments and Development; Baumstark et al., 2021; Luderer et al., 2020, Pietzcker et al. 2021) ist ein globales multi-regionales Energie-Wirtschafts-Klima-Modell, das ein Wirtschaftswachstumsmodell mit einer detaillierten Modellierung des Energie-, Agrar- und Klimasystems kombiniert.
- TIMES-PanEU ist ein multi-regionales Energiesystemmodell, das alle 27 Mitgliedstaaten der EU (EU27) sowie das Vereinigte Königreich, die Schweiz und Norwegen umfasst. Das Modell minimiert eine Zielfunktion, die die gesamten diskontierten Systemkosten über den Zeithorizont von 2010 bis 2050 darstellt, und geht von einem perfekten Wettbewerb zwischen verschiedenen Technologien und Energieumwandlungspfaden aus (Blesl et al. 2010; Blesl 2014; Kattelman et al. 2021).
- NEWAGE (National European Worldwide Applied General Equilibrium; Beestermöller, 2017, Fahl et al., 2019) ist ein globales multi-regionales rekursiv-dynamisches

¹ Detaillierte Modellübersichten finden sich auch im Szenarienreport des Kopernikus-Projektes Ariadne (2021): https://ariadneprojekt.de/media/2021/10/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_Appendix_Modellbeschreibungen.pdf

Allgemeines Gleichgewichtsmodell. Es bildet die Stromerzeugung detailliert mit diskreten Erzeugungstechnologien ab. Zu den Datenquellen gehören u.a. GTAP 9 (Aguar et al., 2016), EXIOBASE 3 (Stadler et al., 2018) und verschiedene IEA-Datenquellen.

- ZEW CGE (Abrell und Rausch, 2021; Abrell et al., 2022) ist ein globales multi-regionales statisches Allgemeines Gleichgewichtsmodell. Es bildet die Stromerzeugung detailliert mit diskreten Erzeugungstechnologien ab.

2.2 Szenarien

Wir untersuchen die Kostenauswirkungen der Aufteilung des EU-CO₂-Budgets zwischen dem EU-EHS und den ESR-E-Sektoren in einem gemeinsamen Szenariorahmen. In allen Szenarien setzen wir das Ziel für 2030 um, die Treibhausgasemissionen in der EU um 55 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Wir variieren die Aufteilung des CO₂-Budgets zwischen dem EU-EHS und der ESR-E, indem wir den Anteil der ESR-E am gesamten EU-CO₂-Budget variieren. Wir gehen davon aus, dass der CO₂-Handel im Rahmen des EU-EHS und der ESR-E zu zwei europäischen CO₂-Preisen führt. Zusätzlich zum EU-EHS-/ESR-E-System modellieren wir auch ein *Fulltrade* Szenario mit vollständigem Handel als Referenzpunkt. In diesem wird ein einziges EU-Emissionshandelssystem eingeführt, das zu einem einzigen CO₂-Preis führt.

Verhältnis von Szenarien und politischen Vorschlägen

Die in unserer Analyse verwendeten Modelle sind zwar gut geeignet, um die grundlegenden Gestaltungsentscheidungen der aktuellen politischen Debatte zu bewerten, sie spiegeln jedoch nicht in allen Aspekten die politische Realität genau wider. Insbesondere die folgenden Punkte müssen bei der Interpretation unserer Ergebnisse berücksichtigt werden:

- *Sektorale Abdeckung und Erfassung der Treibhausgas-(THG-)Emissionen:* Die Analyse konzentriert sich auf energiebezogene CO₂-Emissionen, d.h. wir abstrahieren von nicht energiebezogenen CO₂- und anderen THG-Emissionen.² Dies bedeutet, dass unser ESR-E-Sektor eine große Überschneidung mit den von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen EHS2-Sektoren aufweist.

In Wirklichkeit überschneiden sich der sektorale Anwendungsbereich des ESR und des EHS2 in geringerem Maße: Während das EHS2 nur Emissionen aus Gebäuden und dem Straßenverkehr abdecken würde, deckt das ESR alle Emissionen ab, die nicht dem EU EHS unterliegen außer LULUCF Emissionen, und umfasst somit zusätzlich zu den im EHS2 abgedeckten Emissionen aus Gebäuden und dem Straßenverkehr auch Emissionen aus Landnutzung, Landwirtschaft, Abfall, Binnenschifffahrt und Kleinindustrie (European Commission 2021). Derzeit wird im EU-Parlament sogar diskutiert, dass zu Beginn nur Emissionen aus dem gewerblichen Straßenverkehr und aus gewerblichen Gebäuden vom EHS2 erfasst werden. Da unsere Analyse jedoch auf das Jahr 2030 ausgerichtet ist, gehen wir davon aus, dass zu diesem Zeitpunkt auch der private Straßenverkehr und private Gebäude unter das EHS2 fallen werden.

- *Ergänzende Politikinstrumente:* In unseren Szenarien sind CO₂-Preise das einzige neue Politikinstrument, um die Reduktionsziele für 2030 zu erreichen. Sie werden in Anlehnung an Cap-and-Trade-Systeme eingeführt, d.h. wir legen eine quantitative Emissionsobergrenze fest und die Modelle bestimmen endogen den entsprechenden CO₂-Preis. Abgesehen davon berücksichtigen wir keine zusätzlichen politischen Maßnahmen, um die Emissionsreduzierung im Vergleich zum Basispfad des jeweiligen Modells zu erreichen. Einige Modelle beziehen jedoch zusätzliche politische Maßnahmen in die Basispfad-Projektion ein. Daher ist ein Teil der Unterschiede in den Ergebnissen auf optimistischere Annahmen für den Basispfad zurückzuführen (siehe Anhang).

In der Realität wird der Emissionshandel wahrscheinlich weiterhin durch flankierende Maßnahmen, wie Förderprogramme für Erneuerbare Energien, Energieeffizienzmaßnahmen und Verkehrspolitik, ergänzt. Das Fehlen zusätzlicher politischer Maßnahmen in den Modellierungen hat daher starke Auswirkungen auf die Interpretation unserer CO₂-Preise: Sie sollten als implizite CO₂-Preise oder als Grenzver-

² Einige Modelle bilden jedoch auch die gesamten Treibhausgasemissionen ab (siehe Anhang). Aus Gründen der Vergleichbarkeit konzentrieren wir uns jedoch in der Analyse auf die energiebezogenen CO₂-Emissionen.

meidungskosten betrachtet werden. Ergänzende Maßnahmen in Form von Technologiestandards oder Subventionen würden somit die beobachteten CO₂-Preise senken, aber die gesamten Vermeidungskosten aufgrund von Ineffizienzen erhöhen, die sich aus der mangelnden Flexibilität ergeben, Emissionen dort zu verringern, wo es am günstigsten ist.

- *AEA-Handel:* In unserer Analyse gehen wir davon aus, dass die Länder von der bestehenden Flexibilitätsoption Gebrauch machen, ihre jährlichen Emissionszuteilungen (engl. Annual Emission Allocation, AEA) zu handeln. D.h. Länder, die ihre jährlichen ESR-Ziele übererfüllen, verkaufen ihren Zertifikatsüberschuss an Länder, die ihre Ziele verfehlen. Dies ist unter dem Gesichtspunkt der wirtschaftlichen Effizienz von Vorteil, da die Emissionen dort reduziert werden, wo es am günstigsten ist. Diese Annahme bedeutet auch, dass in unseren Modellen der AEA-Handel im Rahmen der ESR-E zu einem gleichwertigen Minderungsergebnis führt wie das EHS2 (unter der Annahme, dass sie dieselben Sektoren abdecken). In der Praxis stößt der AEA-Handel jedoch auf erhebliche Hindernisse, was zu heterogenen CO₂-Preisen in den Mitgliedstaaten und höheren Gesamtvermeidungskosten führt.

3. CO₂-Preisspannen zwischen den Modellen

Abbildung 1 zeigt die CO₂-Preise für das EU-EHS und die ESR-E-Sektoren in Abhängigkeit des Anteils des CO₂-Budgets, der den ESR-E-Sektoren zugewiesen wird. Je höher dieser Anteil an der Aufteilung des Budgets ist, desto mehr Reduktionsmaßnahmen müssen in den EU-EHS-Sektoren durchgeführt werden. Erwartungsgemäß steigen die EU-EHS-Preise (links) und sinken die ESR-E-Preise (rechts) mit einem höheren ESR-E-Budget. Die schwarze gepunktete Linie zeigt die im EU-Parlament diskutierte Preisobergrenze an.

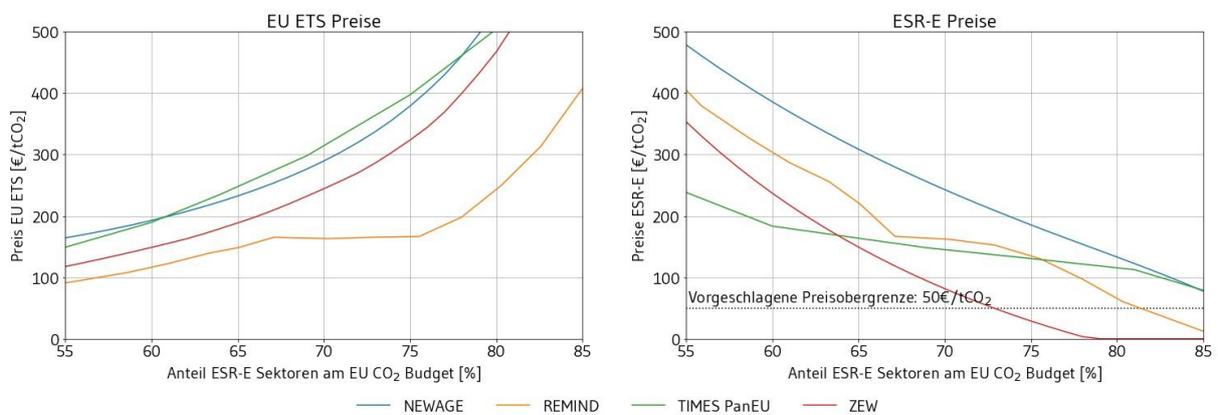


Abbildung 1: CO₂-Preise im Jahr 2030 in den Sektoren EU-EHS und ESR-E

Anmerkung: Eigene Berechnungen. Die Grafiken zeigen den impliziten CO₂-Preis (y-Achse, gemessen in €₂₀₂₁/tCO₂), d.h. die Grenzvermeidungskosten des EU-EHS (links) und der ESR-E (rechts) in Abhängigkeit von der Zuweisung des EU-CO₂-Budgets für 2030 (x-Achse). Die Zuweisung des Budgets wird als der Anteil des energiebezogenen CO₂ ausgedrückt, der den ESR-E-Sektoren zugewiesen wird. Eine Verschiebung von links nach rechts entspricht daher einer Umverteilung des CO₂-Budgets vom EU-EHS zu den ESR-E und erhöht (verringert) somit den EU-EHS-(ESR-E)Minderungsaufwand. Die schwarze gepunktete Linie zeigt die im Parlament diskutierte Preisobergrenze an.

Abbildung 2 zeigt die Modellergebnisse für die von der EU-Kommission vorgeschlagene Budgetaufteilung. Die EU-EHS-Preise liegen zwischen 130 und 210 €/tCO₂, während die ESR-Preise zwischen 175 und 350 €/tCO₂ liegen. Angesichts der Unterschiede zwischen den verschiedenen Modelltypen ist diese Bandbreite erstaunlich klein.

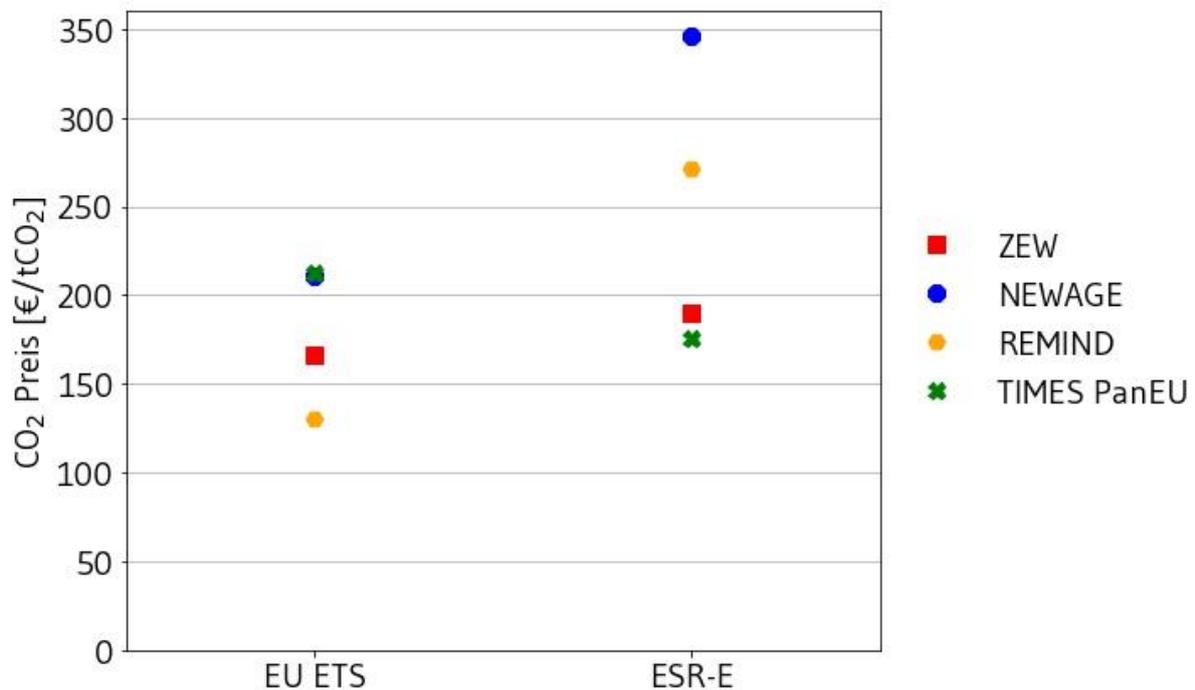


Abbildung 2: CO₂-Preise im Jahr 2030 in den EU-EHS- und ESR-Sektoren für die von der Europäischen Kommission vorgeschlagene Budgetaufteilung

Anmerkung: Eigene Berechnungen. Bild zeigt die impliziten CO₂-Preise (linke Achse, gemessen in €₂₀₂₁/tCO₂) der einzelnen Modelle für das EU-EHS (links) und die ESR-E-Sektoren (rechts) unter der von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Mittelzuweisung, d.h. für etwa 62-63 % der energiebezogenen CO₂-Emissionen.

Die Ergebnisse führen zu drei wesentlichen Erkenntnissen: Erstens liegen unsere Preisschätzungen für das EU-EHS und die ESR-E deutlich über den 50 bis 80 €/tCO₂, die im Impact Assessment der Europäischen Kommission angegeben werden. Dieser Preisunterschied lässt sich zum Teil dadurch erklären, dass das Impact Assessment eine breite Palette zusätzlicher politischer Maßnahmen umfasst, während sich unsere Modelle auf das CO₂-Preisinstrument konzentrieren. Da die Stringenz der ergänzenden Maßnahmen im Wesentlichen von den einzelnen Mitgliedstaaten abhängt, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die Preise ohne eine Preisobergrenze höher wären als von der Kommission derzeit angegeben. Wird der ESR-E-Preis jedoch, wie im EU-Parlament diskutiert, auf 50 €/tCO₂

gedeckt, müssten erhebliche Minderungen durch ergänzende politische Maßnahmen, wie technologische Standards oder Subventionen, erreicht werden, um die Emissionen in den ESR-E-Sektoren ausreichend zu reduzieren.

Zweitens ist die Spanne des ESR-E-Preises im Modellvergleich breiter als die des EHS. Dies spiegelt die viel größeren Unsicherheiten hinsichtlich der Vermeidungskosten und der Wirksamkeit zusätzlicher Maßnahmen in den ESR-E-Sektoren im Vergleich zu den EU-EHS-Sektoren wider. Im Stromsektor beispielsweise sind die Vermeidungskosten relativ gut bekannt. Im Gegensatz dazu haben wir in den Sektoren Gebäude und Verkehr weniger Informationen und Gewissheit über Vermeidungskosten und Nachfrageelastizitäten, da diese von vielen unsicheren Faktoren abhängen, einschließlich des Verhaltens der Haushalte.

Drittens deutet die geringe Preisdifferenz zwischen den EU-EHS- und den ESR-E-Preisen bei der vorgeschlagenen Budgetaufteilung darauf hin, dass die Gewinne aus dem CO₂-Handel zwischen den ESR-E- und EU-EHS-Sektoren begrenzt sind. Dies bedeutet, dass die vorgeschlagene Aufteilung der CO₂-Budgets zwischen den Sektoren relativ gut gewählt ist.

Im nächsten Abschnitt analysieren wir die potenziellen Wohlfahrtsgewinne verschiedener Budgetaufteilungen im Detail.

4. Optimale Aufteilung des EU-CO₂-Budgets

Abbildung 3 zeigt den CO₂-Preis im EU-EHS und im ESR-E in Abhängigkeit von der Zuweisung des CO₂-Budgets zusammen mit dem Wohlfahrtsmaß des jeweiligen Modells. Während die Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle (NEWAGE, ZEW CGE) direkt die Wohlfahrt ausweisen, gibt REMIND das Bruttoinlandsprodukt (BIP) und TIMES-PanEU die Kosten des Energiesystems als Wohlfahrtsmaß an. Da die Nachfrage in TIMES-PanEU konstant ist, sind Änderungen der Kosten gleichbedeutend mit Änderungen der wirtschaftlichen Wohlfahrt. Wohlfahrtsänderungen werden im Vergleich zum Fulltrade-Szenario gemessen, das einen einheitlichen CO₂-Preis in der gesamten EU einführt und daher einen Indikator für die Regulierung mit den geringsten Vermeidungskosten darstellt.³ Aus diesen Ergebnissen können wir die folgenden drei wesentlichen Erkenntnisse ableiten:

Erstens liegen die CO₂-Preise im Rahmen des *Fulltrade-Szenarios* zwischen 163 €/tCO₂ und 266 €/tCO₂. Auch hier sind sie deutlich höher als die von der Europäischen Kommission angegebenen Preise.

Zweitens weisen die Modelle beim *Fulltrade-Szenario* zwischen 60 und 70 % des EU- CO₂-Budgets den ESR-E-Sektoren zu. Daher liegt die seitens der EU vorgeschlagene Budgetaufteilung von 62-63 % am unteren Ende dieser Spanne.

Drittens deuten die relativ flachen Kostenkurven darauf hin, dass eine geringfügige Abweichung bei der Aufteilung der CO₂-Budgets zwischen EU-EHS- und ESR-E-Sektoren keine größeren Auswirkungen auf die Wohlfahrt hat. Dies bedeutet, dass geringfügige Änderungen der Aufteilung von einigen Prozentpunkten keine wesentlichen Auswirkungen auf die Wohlfahrt haben. Wenn jedoch mehr als 70 % des Gesamtbudgets dem ESR-E-Budget zugewiesen werden, beginnen die EU-EHS-Preise steiler anzusteigen, was die Wohlfahrt erheblich verringert.

³ Bei Modellen, die eine Besteuerung von Rohstoffen und/oder Einkommen und/oder Endenergie vorsehen (NEWAGE, ZEW CGE, REMIND), kann die optimale Lösung, d.h. die Lösung mit den geringsten Kosten, aufgrund von Steuerinteraktionseffekten leicht vom Fulltrade-Szenario abweichen (z. B. Boeters, 2014; Goulder, 1995).

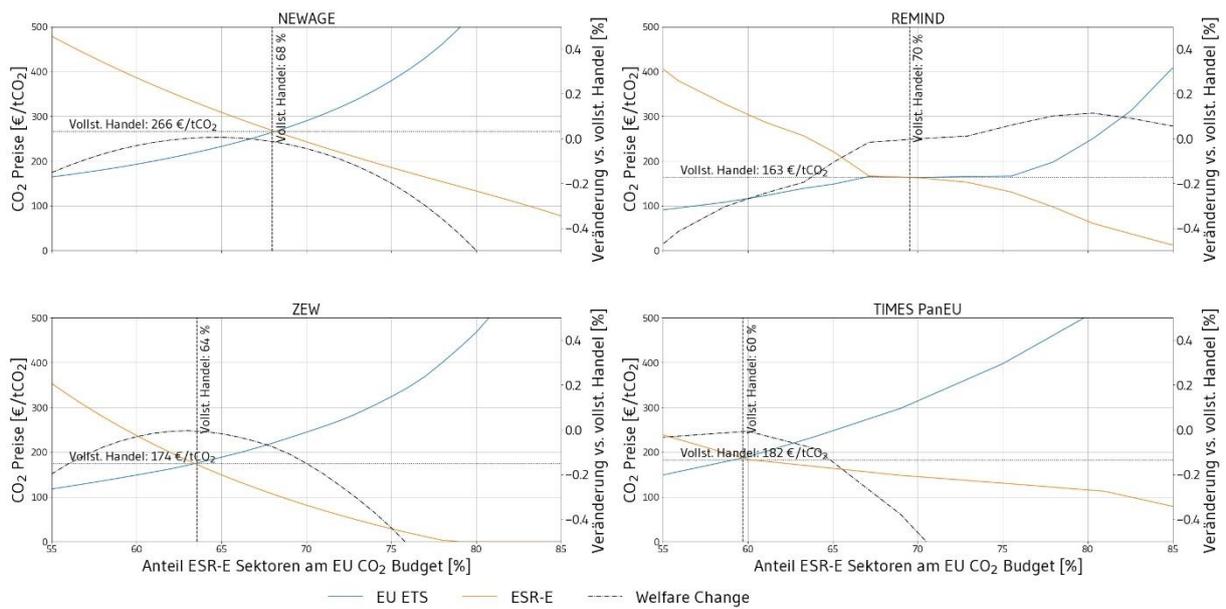


Abbildung 3: Optimale Aufteilung zwischen ESR-E- und EHS-Sektoren

Anmerkung: Eigene Berechnungen. Die Grafiken zeigen die impliziten CO₂-Preise (linke Achse, gemessen in €₂₀₂₁/tCO₂) für das EU-EHS (blaue Linie) und die ESR-E (orange Linie) in Abhängigkeit von der Zuteilung des energiebezogenen CO₂-Budgets der EU (x-Achse) für jedes Modell. Die rechte Achse misst die Wohlfahrtskosten einer Abweichung von einem einzigen, für alle Sektoren einheitlichen EU-CO₂-Preis (schwarze gestrichelte Linie). Die horizontale gepunktete Linie zeigt den jeweiligen EU-weit einheitlichen CO₂-Preis (vollständiger Handel). Die vertikale gepunktete Linie zeigt die Zuweisung des CO₂-Budgets unter diesem einheitlichen Preis.

5. Schlussfolgerungen

Wir führen eine Multi-Modell-Bewertung der Zuteilung des CO₂-Budgets auf die EU-EHS- und ESR-E-Sektoren auf der Grundlage von vier Modellen durch. Wir stellen fest, dass der von der Kommission vorgeschlagene Emissionsanteil für die ESR-E-Sektoren von etwa 62-63 % (64 % auf der Grundlage der gesamten THG-Emissionen) am unteren Ende des von den Modellen ermittelten optimalen Bereichs liegt. Dennoch zeigt keines der Modelle einen größeren Wohlfahrtsverlust für die von der Kommission vorgeschlagene Aufteilung des Budgets im Vergleich zur jeweiligen optimalen Aufteilung. Genauer gesagt sind in unserem Modellierungsrahmen die Wohlfahrtskosten einer getrennten EU-Klimapolitik im Vergleich zu einem einheitlichen CO₂-Preis überraschenderweise relativ unabhängig von der Aufteilung des EU-CO₂-Budgets.

Für die von der EU-Kommission vorgeschlagene Aufteilung des THG-Budgets ergeben unsere Modelle eine Preisspanne von 130 bis 210 €/tCO₂ für das EU-EHS und eine Preisspanne von 175-350 €/tCO₂ für die ESR-E-Sektoren. Diese Spannen liegen deutlich über den von der Europäischen Kommission angegebenen Preisen.

Dies hat mehrere Auswirkungen auf die aktuelle politische Debatte. Erstens: Wenn der EHS2-Preis, wie im Europäischen Parlament diskutiert, bei 50 €/tCO₂ gedeckelt würde, wären strengere ergänzende Maßnahmen erforderlich, um das Ziel zu erreichen. Während in diesem Fall die beobachteten CO₂-Preise relativ niedrig sind, werden die Gesamtvermeidungskosten für die Verbraucher aufgrund der Ineffizienz, die sich aus der mangelnden Flexibilität ergibt, Emissionen dort zu verringern, wo es am günstigsten ist, noch höher sein. Zweitens wäre ein etwas ehrgeizigeres Reduktionsziel in den Sektoren des EU-EHS, wie im EU-Parlament diskutiert, aus Sicht der wirtschaftlichen Effizienz vorteilhaft, wenn das ESR-Ziel entsprechend reduziert würde. Und schließlich sind die Wohlfahrtseffekte relativ unabhängig von kleineren Verschiebungen in der Budgetaufteilung. Sollten also im Laufe der kommenden Verhandlungen weitere Anpassungen erforderlich sein, so wären die Auswirkungen auf die Gesamtwohlfahrt gering.

Literaturangaben

- Abrell, J, Huang, P, Rausch, S, 2022. Fixing Fragmented Carbon Marktes in Europe. Mimeo.
- Abrell, J, Rausch, S, 2021. A Smart Design of New EU Emissions Trading Could Save 61 Per Cent of Mitigation Costs, ZEW policy brief Nr. 21-05, Mannheim.
- Aguiar A, Narayanan B, McDougall R, 2016. An Overview of the GTAP 9 Data Base. *Journal of Global Economic Analysis* 1, no. 1: 181-208.
<https://jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/23>
- Baumstark L, Bauer N, Benke F, Bertram C, Bi S, Gong CC, Dietrich JP, Dirnaichner A, Giannousakis A, Hilaire J, et al., 2021. REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits. *Geoscientific Model Development Discussions*: 1–50 DOI: 10.5194/gmd-2021-85.
- Beestermöller R, 2017. Die Energienachfrage privater Haushalte und ihre Bedeutung für den Klimaschutz - Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell. Eigenverlag, Stuttgart (Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; ISSN 0938-1228) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-9123>.
- Blesl M, Kober T, Bruchhof D, Kuder R, 2010. Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond. *Energy Policy*, 38(10): 6278–6292 DOI: 10.1016/j.enpol.2010.06.018.
- Boeters, S, 2014. Optimally differentiated carbon prices for unilateral climate policy. *Energy Economics*, 45: 304–312.
- European Commission (2021): Proposal for a regulation amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement, COM(2021) 555 final.
- Fahl U, Gaschnig H, Hofer C, Hufendiek K, Maier B, Pahle M, Pietzcker R, Quitzow R, Rauner S, Sehn V, et al., 2019. Das Kopernikus-Projekt ENavi – Die Transformation des Stromsystems mit Fokus Kohleausstieg. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10519>.
- Goulder, L, 1995. Effects of Carbon Taxes in an Economy with Prior Tax Distortions: An Intertemporal General Equilibrium Analysis." *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(3): 271–297.
- IEA, 2020. World Energy Outlook. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- Kopernikus-Projekt Ariadne, 2021: Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich.
<https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>
- Luderer G, Bauer N, Baumstark L, Bertram C, Leimbach M, Pietzcker R, Strefler J, Aboumahboub T, Auer C, Bauer N, et al., 2020. REMIND - REgional Model of INvestments and Development. Zenodo DOI: 10.5281/zenodo.3899869.
- Loulou R, Kanudia A, Lethila A, Goldstein G, 2016a. Documentation for the TIMES Model, Part I. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf
- Loulou R, Goldstein G, Lettila A, Remme U, 2016b. Documentation for the TIMES Model, Part II. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II_July-2016.pdf.
- Luderer G, Bauer N, Baumstark L, Bertram C, Leimbach M, Pietzcker R, Strefler J, Aboumahboub T, Auer C, Bauer N, et al., 2020. REMIND - REgional Model of INvestments and Development. Zenodo DOI: 10.5281/zenodo.3899869.

- Pietzcker, R.C., Feuerhahn, J., Haywood, L., Knopf, B., Leukhardt, F., Luderer, G., Osorio, S., Pahle, M., Dias Bleasby Rodrigues, R., Edenhofer, O., 2021. Notwendige CO₂-Preise zum Erreichen des europäischen Klimaziels 2030. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.007>
- Stadler K, Wood R, Bulavskaya T, Södersten C-J, Simas M, Schmidt S, Usubiaga A, Acosta-Fernández J, Kuenen J, Bruckner M, et al., 2018. EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. *Journal of Industrial Ecology*, 22, 502–515. <https://doi.org/10.1111/jiec.12715>

Anhang

Modellcharakteristiken

Modell	Basisjahr	Dynamik	Regionale Abdeckung	THG-Erfassung	Sektorale Abdeckung
NEWAGE	2011	rekursiv-dynamisch	18 Regionen: Deutschland, Frankreich, Italien, Polen, Spanien+Portugal, Benelux, nördliche EU (Schweden, Finnland, Dänemark, Lettland, Estland, Litauen, Irland), südöstliche EU (Österreich, Tschechische Republik, Slowenien, Slowakei, Ungarn, Kroatien, Griechenland, Zypern, Malta, Bulgarien, Rumänien), Vereinigtes Königreich, USA, China, Indien, Russland, Brasilien, Südafrika, OPEC und arabische Welt, Rest der OECD, Rest der Welt	Energiebezogene CO2-Emissionen	23 Sektoren: Verkehr, Rohöl, Erdölraffination, Kohle, Erdgas, Elektrizität, Papier und Zellstoff und Druck, Glas, Zement, übrige nichtmetallische Mineralien, Aluminium, Kupfer, übrige Nichteisenmetalle, Fahrzeuge, Chemie, Eisen und Stahl, Maschinen, Nahrungsmittel und Tabak, Gebäude, Landwirtschaft, Dienstleistungen, Wohnungen, übrige Industrie)
REMIND	2010	Perfekte Voraussicht, 2005-2150	Aufteilung der EU in 9 Subregionen, 12 weitere Regionen zur Abdeckung der Welt	Kyoto-Gase; alle energiebedingten Emissionen aus Verkehr/Gebäuden/Industrie, Emissionen aus Industrieprozessen; CH4/N2O/CO2 aus Landwirtschaft, Landnutzung, Landnutzungsänderung;	Verkehr, Gebäude, Industrie, Energieversorgung
TIMES PanEU	2005	Perfekte Voraussicht, 2010-2050	Alle EU-Mitgliedstaaten, Großbritannien, Schweiz, Norwegen	Energie- und verfahrensbedingte Emissionen von CO2, CH4 und N2O, + Landwirtschaft; Abfälle nicht berücksichtigt.	Industrie, Wohngebäude, Gewerbe, Verkehr, Landwirtschaft, Elektrizität
ZEW CGE	2014	Nein	Alle EU-Mitgliedstaaten, wobei Luxemburg, Malta und Zypern zu einer Region zusammengefasst sind. Rest der OECD, Brasilien, China, OPEC, Russland, Südafrika, Indien, USA, Rest der Welt	Energiebezogene CO2-Emissionen	Landwirtschaft, energieintensive Industrien, verarbeitendes Gewerbe, Verkehr, Dienstleistungen, Kohle-/Gas-/Erdölförderung, raffinierte Öle, Stromerzeugung (unter Einsatz diskreter Erzeugungstechnologien)

Tabelle 1 : Modellmerkmale

Modell	Energie-Effizienz	Politiken Basisjahr / Basisjahr	Trägheit der Transformation	Technologische Annahmen	EU-Reduktion 2030 gegenüber 2005 [%]	EU-THG-Budget 2030 [MtCO ₂ eq]	Reduktionsziele andere Länder
NEWAGE	Exogener Energieeffizienzfortschritt (AEEI), Verbesserungen der Energieproduktivität	Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland nach 2020, andere nicht-preisbasierte Maßnahmen	Regionalspezifisches Kapital mit Abschreibungssatz 4% p.a., technologiespezifisches Kapital mit expliziten Kapitalabschreibungskurven für Stromerzeugungstechnologien	Mehrere Grenzwerte für die Stromerzeugung	52.2%	1577	vs. 2011: UKI 54%, OEC 41%, USA 47%, BRZ 23%, RUS 20%, IND -28%, CHI 20%, RSA 26%, OPA -15%, ROW 1% (basierend auf IEA, 2020)
REMIND	dargestellt über die CES-Substitution von Kapital gegen Energie auf der obersten Ebene (Kapital, Arbeit, Energie)	Subventionen für BEV in Übereinstimmung mit den historischen Subventionen (um die für 2020 beobachteten Verkaufsteile zu erreichen)	Alle Energieversorgungstechnologien, das Stromnetz, Autos und Lastwagen werden mit expliziten Jahrgängen modelliert; für Gebäude und Industrie wird die Substitution durch die CES-Funktion mit Substitutionselastizitäten zwischen 1 und 3 bestimmt	keine harten Grenzen für die Ausdehnung, sondern Kosten für die Hochskalierung, die mit dem Quadrat des relativen Anstiegs gegenüber dem letzten Zeitschritt zunehmen	50.0%	2330	globales CO ₂ -Budget von 2020 bis zum Spitzenjahr von 900 Gt CO ₂ (Szenario "deutlich unter 2 °C", mit einer mittleren Spitzenerwärmung von ~1,6-1,7 °C)
TIMES PanEU	Energieeinsparungsgesetz für Gebäude (EnEV als Teil des GEG); Teile des Energiedienstleistungsgesetzes (Industrie); Reduktionsquoten für den Flottenverbrauch im Verkehr	Aktueller Stand der Regulierungsmaßnahmen: Kohleausstieg der EU-Mitgliedstaaten, Biokraftstoffquoten (bis 2030), Erneuerbare-Energien-Gesetz für Wohngebäude, Ausstieg aus der Ölförderung im Gebäudesektor nach 2026	Unter Berücksichtigung der Bestände und der Lebensdauer, der maximal neu installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien, der Versorgungssicherheit und der benötigten Ausgleichsenergie, der Bauzeiten für große Investitionen	wirtschaftlicher Fortschritt bei emissionsfreien Technologien (z. B. Elektrolyse, Brennstoffzellen, Batterien)	46.7%	2140	Schweiz und Norwegen: Treibhausgasneutralität im Jahr 2045, Großbritannien im Jahr 2050
ZEW CGE	Keine zusätzlichen Verbesserungen der Energieeffizienz angenommen	Keine zusätzlichen Politiken angenommen	Die Anpassungsfähigkeit des Kapitals für Stromerzeugungstechnologien wird durch die CET-Funktion mit einer Transformationselastizität von eins bestimmt.	Elektrizität: kein Ausbau der Kern- und Wasserkraft, "andere" Technologien dürfen um 50% ausgebaut werden	47.7%	1523	OEC 40%, USA 44%, BRZ 33%, RUS 16%, IND -4%, CHI 25%, RSA 28%, OPA 0%, ROW 3%

Tabelle 2: Basisjahr und Szenario-Annahmen



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:



@AriadneProjekt



Kopernikus-Projekt Ariadne



ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? In der griechischen Mythologie gelang Theseus durch den Faden der Ariadne die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne im Konsortium von mehr als 25 wissenschaftlichen Partnern. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung KlimaWirtschaft | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung