

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	ELECTRO_COUP
Langtitel:	Electrification of heating and mobility: Socioeconomic impacts of non-ETS policies with sector coupling and sectoral linkages
Zitiervorschlag:	Kratena, K., Frank-Stocker, A., Müller, A. (2023). Electrification of heating and mobility: Socioeconomic impacts of non-ETS policies with sector coupling and sectoral linkages. Final report on the research endeavor in the course of the ACRP13 Programme.
Programm inkl. Jahr:	ACRP 13th Call for Proposals (2020)
Dauer:	01.10.2021 bis 30.06.2023
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Centre of Economic Scenario Analysis and Research (CESAR)
Kontaktperson Name:	Dr. Kurt Kratena
Kontaktperson Adresse:	Fuhrmannsgasse 2a/4, 1080 Wien
Kontaktperson Tel:	+43 699 12233989
Kontaktperson E-Mail:	kurt.kratena@cesarecon.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Westfälische Wilhelms-Universität Münster (WWU) Münster, Lehrstuhl für Mikroökonomik, insbes. Energie- und Ressourcenökonomik (Deutschland)
Schlagwörter:	Dekarbonisierung, Sektorkopplung
Projektgesamtkosten:	122.939 €
Fördersumme:	122.939 €
Klimafonds-Nr:	KR20AC0K18191
Erstellt am:	10.07.2023

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Ausgangssituation und Zielsetzung

Im Projekt ELECTRO_COUP werden Szenarien zur Dekarbonisierung des österreichischen Wärme- und Verkehrssektors entworfen, der nicht Teil des EU-Emissionshandels (Nicht-ETS) ist. Um die erforderlichen weitreichenden Emissionsminderungen im Wärme- und Verkehrsbereich zu erreichen, sind stärkere sektorübergreifende Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Energienutzungen und Energieträgern erforderlich. Dieser Ansatz wird allgemein als „Sektorkopplung“ bezeichnet. Der Begriff impliziert die Integration mehrerer Energiesysteme, wie Elektrizität, Wärme und Mobilität, um von neuen Energiequellen und Technologielösungen zu profitieren.

In ELECTRO_COUP wird analysiert, ob zusätzlicher erneuerbarer Strom, der in Nicht-ETS-Sektoren genutzt wird, zu einer Dekarbonisierung führen kann. Das Projekt verbessert somit die Erkenntnisse über das Dekarbonisierungspotenzial der Sektorkopplung in Österreich und illustriert die damit verbundenen sozio-ökonomischen Effekte. Der gewählte integrative Modellierungsansatz deckt sektorale Leakages ab und liefert Hinweise auf mögliche Probleme im Stromsektor aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung in den Bereichen Mobilität und Wärme. Die Ergebnisse einer solchen Analyse zeigen, dass die Verlagerung der fossilen Energienutzung vom Endverbrauch auf die CO₂-intensive Stromerzeugung eine Bedrohung darstellen kann, die im Policy-Mix berücksichtigt werden muss.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Neben einem Basisszenario wurden drei Dekarbonisierungsszenarien für Mobilität und Raumwärme in Österreich entwickelt. Diese Szenarien zeigen Wege auf, wie Sektorkopplung und Elektrifizierung im Verkehr und in den Haushalten zur Dekarbonisierung der Nicht-ETS-Sektoren beitragen können. Die vorgenommene Differenzierung in hohe und niedrige Systemeffizienz veranschaulicht, dass die Dekarbonisierung durch direkte Elektrifizierung (kosteneffizient) oder durch Einsatz von E-Fuels und Wasserstoff (niedrige Effizienz und hohe Kosten) erreicht werden kann. Das im Projekt entwickelte Input-Output-Modell mit Energie (LEEM) bildet den Transformationsprozess hin zu einem nachhaltigen österreichischen Energiesystem adäquat ab. Um einen detaillierteren Überblick über die Treiber, Hindernisse und Möglichkeiten der Dekarbonisierung zu erhalten, wird das LEEM-Modell an zwei Bottom-up-Modelle angekoppelt: (i) das Invert-Modell, das sich auf Energiedienstleistungen für Raumwärme und Warmwasser konzentriert, und (ii) der Bottom-up-Datensatz aus dem NEMO-Modell für den Privat- und Güterverkehr.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass eine durch Klimapolitik (CO₂-Preisgestaltung) vorangetriebene Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor zu einer Verbesserung der Energieeffizienz sowie zusätzlicher Elektrifizierung führt. Bereits das Basisszenario zeigt eine erhebliche Elektrifizierung in den Bereichen Wärme

und Verkehr (Privat- und Güterverkehr), die in den Dekarbonisierungsszenarien noch verstärkt wird. Die Elektrifizierung im Basisszenario (+198 PJ) stammt zu mehr als 50% (+106 PJ) aus der Elektrifizierung im Nicht-ETS-Sektor. Der zusätzliche Strombedarf durch die Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor beträgt gegenüber dem „Baseline“ 280 PJ, also lediglich um ca. 40% mehr als der Zuwachs im Basisszenario und kann bei Dekarbonisierung mit hoher Systemeffizienz durch zusätzliche erneuerbare Erzeugung gedeckt werden. Geht man vom „Worst Case“ der Sektorkopplung aus, indem der zusätzliche Strombedarf durch fossile (Gas-)Stromerzeugung gedeckt wird, sind die Investitionen in erneuerbare Kapazitäten geringer als im ersten Dekarbonisierungsszenario und der Strompreis steigt bis 2040 um 20% aufgrund höherer Kosten für CO₂-Zertifikate.

Die Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor ist mit gesamtwirtschaftlich relevanten Effekten verbunden: (i) Investitionseffekte, die positive Wirkungen wie erhöhte Investitionen in die thermische Sanierung und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, aber auch negative Effekte wie Rückgänge der Autokäufe aufweisen. (ii) Rebound-Effekte, die positive Auswirkungen aufgrund von Energieeinsparungen zeigen. (iii) Rückkopplungseffekte auf die Nachfrage, die durch den Strompreis entstehen. Die Effekte (i) und (ii) wirken positiv, der Effekt (iii) dämpft die positiven Wirkungen im Falle der Sektorkopplung mit fossiler Stromerzeugung.

In einem weiteren Szenario konzentrieren wir uns auf einen alternativen Ansatz. Anstatt die Effizienz zu verbessern und direkt Strom zu nutzen, untersuchen wir die Option, fossile Brennstoffe durch E-Kraftstoffe zu ersetzen. Es handelt sich hierbei jedoch um ein hypothetisches Szenario, da es nicht wahrscheinlich ist, dass E-Fuel-Technologien aufgrund ihrer hohen Kosten auf breiter Basis angenommen werden. Dieses Szenario führt zwar zu einer ähnlichen Emissionsreduktion wie die anderen Szenarien, ist jedoch mit höheren Kosten verbunden und hat geringere positive wirtschaftliche Auswirkungen.

Ausblick und Zusammenfassung

Die Szenarioanalyse zeigt, dass Effizienzsteigerungen in Verbindung mit direkter Elektrifizierung im Nicht-ETS-Sektor zu einer Dekarbonisierung mit nur geringen Sektorkopplungseffekten bei der Stromerzeugung führen können. Im schlimmsten Fall gehen etwa 40% der Emissionsreduktion im Nicht-ETS aufgrund intersektoraler Leakages verloren. Die Sektorkopplung führt zu höheren Strompreisen und geringeren positiven wirtschaftlichen Auswirkungen der Dekarbonisierung.

Es ist jedoch wichtig, die Grenzen der Analyse zu berücksichtigen. Die Studie konzentriert sich auf ein Land (Österreich), ohne die Rückkopplungen zum und vom EU-Zertifikatemarkt zu betrachten. Außerdem werden in der Analyse die Technologieentscheidungen im Stromsektor nicht explizit modelliert, und wichtige ergänzende Technologien wie die Energiespeicherung bleiben unberücksichtigt. Die Beachtung dieser Einschränkungen in künftigen Analysen kann ein umfassenderes Verständnis der Auswirkungen der Sektorkopplung ermöglichen.

2 Executive Summary

Motivation and aims

In the project ELECTRO_COUP, comprehensive scenarios are developed to achieve full decarbonization in the transport and heating sectors in Austria, which are not covered by the EU Emissions Trading (non-ETS). These scenarios are aligned with Austria's decarbonization targets and provide insights into their effects on energy and socio-economic indicators. To achieve the necessary emission reductions, the project emphasizes the importance of stronger cross-sectoral linkages between various energy uses and carriers. This integrated approach, commonly known as sector coupling, aims to harmonize and leverage various energy systems, including electricity, heating, and mobility, to capitalize on new energy sources and technological solutions. Such cross-sectoral linkages are recognized as cost-effective strategy for decarbonization, providing enhanced flexibility to the energy system.

The analysis focuses on determining whether further renewable electricity usage in non-ETS sectors can effectively lead to decarbonization. The project employs an integrative modeling approach that considers sectoral leakage and addresses potential challenges arising from the increased electrification in mobility and heating. This contributes to a deep understanding of sector coupling's potential for decarbonization and demonstrates its associated socio-economic impacts.

Results and conclusions

In addition to the baseline scenario, our research encompasses three decarbonization scenarios tailored specifically for mobility and space heating in Austria. These scenarios explore various paths for electrification in both the transport and household sectors, as well as sector coupling, all with the aim of contributing to achieving full decarbonization in the non-ETS sectors by 2040. To highlight different possibilities and levels of efficiency, we differentiate between high and low system efficiency in our scenarios. This illustrates that decarbonization can be achieved by direct electrification (cost-efficient) or by using e-fuels and hydrogen (low efficiency and high cost). The input-output model with energy (LEEM) developed in the project adequately represents the transformation process towards a sustainable Austrian energy system. To get a detailed overview of the drivers, barriers and opportunities for decarbonization, the LEEM model is coupled to bottom-up models: (i) the bottom-up invert model focusing on energy services for space heating and hot water, and (ii) the bottom-up dataset from the NEMO model for private and freight transport in Austria.

The modeling results provide valuable insights into the decarbonization of the non-ETS sector, revealing that policy interventions such as carbon pricing play a pivotal role in driving the transition. This shift towards decarbonization results in notable improvements in energy efficiency and an increased focus on electrification. Even the baseline scenario shows significant electrification in the heating and transport (private and freight) sectors, which is amplified in the decarbonization scenarios.

More than 50% (+106 PJ) of the electrification in the baseline (+198 PJ) comes from electrification in the non-ETS sector. The additional electricity demand in the case of decarbonization in the non-ETS sector is 280 PJ compared to the "Baseline", i.e., only about 40% more than the increase in the baseline scenario and can be met by additional renewable generation in a decarbonization scenario with high system efficiency. Conversely, another scenario assumes a 'worst-case' approach to sector coupling, wherein the additional electricity demand is met by fossil (gas) generation. This leads to lower investments in renewable capacity compared to the first decarbonization scenario. Additionally, higher costs for emission permits result in a 20% increase in electricity prices by 2040.

Decarbonization in the non-ETS sector has significant macroeconomic implications, giving rise to several key effects: (i) Investment effects: These include positive impacts such as increased investment in thermal refurbishment and renewable electricity generation. However, there is a negative impact on car purchases as part of the decarbonization efforts. (ii) Rebound effects: Energy savings resulting from decarbonization lead to positive outcomes. (iii) Demand feedback effects through electricity price. Effects (i) and (ii) have a positive impact, effect (iii) dampens the positive effects in the case of sector coupling based on fossil power generation.

In the scenario with low system efficiency, we focus on an alternative approach to decarbonization. Instead of improving efficiency and using direct electricity, we explore the option of replacing fossil fuels with e-fuels. However, it's important to note that this is a hypothetical scenario, as it is unlikely that e-fuel technologies would be widely adopted, because they are expensive. While this scenario still achieves a similar path of emission reduction as the other two scenarios, it comes at higher costs (aggregate price level) and yields lower positive economic impacts.

Outlook and summary

The analysis reveals that achieving decarbonization in non-ETS sectors through efficiency improvements and electrification can be effective, with only minor sector coupling effects on power generation. However, in the worst-case scenario, about 40% of the emission reductions in the non-ETS sector may be lost due to inter-sectoral leakage. This highlights the potential challenges associated with sector coupling. It is important to note that sector coupling can lead to higher electricity prices and dampen the positive economic impacts of decarbonization efforts.

However, it is crucial to acknowledge the limitations of the analysis. The study is focused on one country (Austria) and does not account for feedbacks to and from the EU permit market, which could influence the overall outcomes. Moreover, the analysis does not explicitly model technology choices in the electricity sector, and important complementary technologies such as energy storage are not considered. Addressing these limitations in future analyses can provide a more comprehensive understanding of the implications of sector coupling and enhance the accuracy of decarbonization predictions.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Im Projekt ELECTRO_COUP werden Szenarien zur Dekarbonisierung des österreichischen **Wärme- und Verkehrssektors** entworfen, die nicht Teil des EU-Emissionshandels (Nicht-ETS) sind. Die Szenarien verfolgen das Ziel, die österreichischen Dekarbonisierungsziele für 2030 und 2040 zu erreichen und zeigen die Auswirkungen auf energie- und sozioökonomische Indikatoren auf. Österreich verfolgt das Ziel, den Stromverbrauch bis 2030 zu 100% aus erneuerbaren Energien zu decken. Außerdem hat sich die österreichische Bundesregierung das ehrgeizige Ziel gesetzt, bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen, also zehn Jahre früher als es die EU vorsieht (IEA 2020)¹.

Während bereits rund 80% der gesamten Stromerzeugung in Österreich aus erneuerbaren Quellen stammt, dominieren im Bereich Wärme und Mobilität bzw. Verkehr bis dato noch fossile Energieträger. Im Jahr 2018 war der Verkehrssektor für 40% der Treibhausgasemissionen verantwortlich und emittierte 24,8 Mio. t CO₂. Heizung, Kühlung und Warmwassernutzung in Gebäuden machten 27% des gesamten Endenergieverbrauchs Österreichs aus und waren im Jahr 2017 für rund 16% der Emissionen im Nicht-ETS-Sektor verantwortlich (FMST u. FMTIT, 2018²).

Um die erforderlichen weitreichenden Emissionsminderungen im Wärme- und Verkehrssektor zu erreichen, sind stärkere sektorübergreifende Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Energienutzungen und Energieträgern erforderlich. Dieser Ansatz wird als **Sektorkopplung** bezeichnet. Sie verfolgt das Ziel verschiedene Sektoren des Energiesystems zu integrieren, um mehr Effizienz und Flexibilität zu erreichen. In ELECTRO_COUP wird insbesondere die Verbindung von Strom, Wärme und Verkehr untersucht. Es wird analysiert, ob zusätzlicher erneuerbarer Strom, der in nicht-ETS-Sektoren genutzt wird, zu einer Dekarbonisierung führen kann. In diesem Sinne verbessert das Projekt die Erkenntnisse über das Potenzial der Sektorkopplung zur Dekarbonisierung in Österreich und beschreibt die damit verbundenen sozioökonomischen Effekte.

Der gewählte integrative Modellierungsansatz deckt **sektorale Leakages** ab und liefert Hinweise auf mögliche Probleme im Stromsektor aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung in den Bereichen Mobilität und Raumwärme. Unter sektoralem Leakage versteht man eine Situation, in der eine Politik wie der Emissionshandel möglicherweise nur für einen Sektor wie den Strom gilt, wodurch dessen Preise steigen und die Nachfrage auf andere Güter verlagert wird. Diese inländische Verlagerung könnte wiederum einen Teil der CO₂-Reduktion des regulierten Sektors aufheben.

Konkret werden folgende Fragen untersucht:

¹ IEA – International Energy Agency (2020). Austria 2020. Energy Policy Review. <https://www.iea.org/reports/austria-2020>

² FMST (Federal Ministry for Sustainability and Tourism) and FMTIT (Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology) (2018). Austrian Climate and Energy Strategy, FMST and FMTIT, Vienna.

- Wie können die Elektrifizierung des österreichischen Mobilitäts- und Wärmesektors und die Sektorkopplung dazu beitragen, die österreichischen Dekarbonisierungsziele für 2030 und 2040 zu erreichen?
- Welche Auswirkungen sind auf Energie- und sozioökonomische Indikatoren (z. B. CO₂, Energieverbrauch und BIP nach Branche, Beschäftigung nach Branche, etc.) zu erwarten?
- Wie viel zusätzlicher Strom wird benötigt, um den Stromsektor mit Verkehr und Wärme zu koppeln, und wie wird dieser zusätzliche Strom angesichts der ETS-Obergrenzen und -Preise bereitgestellt?

Die im Projektantrag gestellte Frage nach den Instrumenten zur Förderung der erneuerbaren Stromerzeugung zur Deckung des zusätzlichen Strombedarfs und von effizienten Speichertechnologien wurde mithilfe einer Studie zur Entwicklung des Stromsektors im Kontext der EU-Emissionsziele "Fit for 55" analysiert (Pietzcker et al. 2021³). Die Autoren dieser Studie haben empirische Ergebnisse ihrer Berechnungen für Österreich bereitgestellt, die im Projekt ELECTRO_COUP anstelle eines eigenen Elektrizitätsektormodells verwendet wurden.

Die Hauptidee aus dieser Studie und den zugrunde liegenden Berechnungen ist, dass aufgrund des kontinuierlich steigenden CO₂-Preises in naher Zukunft nur noch Investitionen in erneuerbare Stromerzeugung wirtschaftlich rentabel sein werden. Dies gilt für alle Szenarien im Projekt ELECTRO_COUP und impliziert, dass auch die begleitenden Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung, einschließlich Netzausbau und effizienter Speichertechnologien, entsprechend umgesetzt werden.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Das Projekt ELECTRO_COUP umfasst folgende Projektaktivitäten:

- Gestaltung von Dekarbonisierungsszenarien für die Nicht-ETS-Sektoren Wärme und Verkehr in Österreich (bis 2040) mit Maßnahmen zur Elektrifizierung und Sektorkopplung.
- Entwicklung eines integrierten Energiewirtschaftsmodells zur verständlichen und adäquaten Erfassung der Transformationsprozesse hin zu einem nachhaltigen österreichischen Energiesystem.
- Modellierung sektorübergreifender Zusammenhänge zur Analyse des Übergangs vom derzeitigen, auf fossilen Brennstoffen basierenden Energiesystem zu einem nachhaltigen, kosteneffizienten Energiesystem.

³ Pietzcker, R. et al. (2021). Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector.

- Einbeziehung von technischem Wissen über Technologien zur Kalibrierung von Modellparametern auf einer angemessenen Bottom-up-Aggregationsebene.
- Simulation der Szenarien und Bewertung der sozioökonomischen Auswirkungen von Dekarbonisierungsstrategien.

Diese Projektschritte wurden in sechs Arbeitspaketen (APs) ausgeführt. Die Ergebnisse der einzelnen APs werden im Folgenden beschrieben.

AP1: Modellentwicklung

In AP1 wurde ein makroökonomisches Input-Output (IO)-Modell mit einem integrierten Energiesystem entwickelt, das auf einem mittleren Disaggregationsniveau arbeitet und Verknüpfungen zwischen verschiedenen Sektoren berücksichtigt. Diese Verknüpfungen umfassen die Sektorkopplung im Energiesystem zwischen Stromerzeugung, -verteilung und -speicherung einerseits und anderen Energiequellen (Wärme, Gas) andererseits sowie unterschiedliche Grade der Einhaltung von Richtlinien und Vorschriften.

Das entwickelte Modell enthält explizit Produktionsverknüpfungen (einschließlich Mengen- und Preisverknüpfungen) und Energienachfrageverknüpfungen zwischen ETS- und Nicht-ETS-Sektoren. Die im Modell konzipierten Mechanismen gewährleisten, dass alle Veränderungen im Energiesystem konsistente Auswirkungen auf die Wirtschaft haben, sowohl auf der Ebene der Mengen als auch der Kosten und Preise. Ein zentraler Bestandteil des integrierten Energiesystems im Modell ist der Bedarf an Mobilität und Wärme, der die Wahl zwischen expliziten Technologien beschreibt. Dies baut auf den Ergebnissen der Bottom-up-Modellierung in AP3 auf.

Einen wesentlichen Schritt der Modellentwicklung stellt die Parametrisierung der Kosten- und Preisseite dar, welche die preisliche Wettbewerbsfähigkeit und die Verlagerung von CO₂-Emissionen ins Ausland bestimmt. Dies umfasst die Modellierung von verschiedenen Faktoren, wie Produktivitätsentwicklungen, Lohnfestsetzungen, globale Energiepreise und Kosten für CO₂-Zertifikate. Durch die sorgfältige Parametrisierung dieser Elemente kann das Modell die Versuche, die Emissionsziele für die Nicht-ETS-Sektoren durch die Umsetzung eines Policy-Mix zu erreichen, effektiv beschreiben.

Außerdem umfasst das Energiesystem eine detaillierte Darstellung der Energieversorgung, einschließlich der Strom- und Wärmeerzeugung sowie der Speicherung. Dabei werden sowohl quantitative Zusammenhänge als auch Kostenstrukturen, Preisgestaltung und Investitionen berücksichtigt. Ein formalisiertes Merit-Order-Preismodell, das die Emissionsobergrenze und die Zertifikatekosten berücksichtigt, dient zur Beschreibung der Strompreise. Infolge der Dekarbonisierung kommt es zu inländischen CO₂-Verlagerungen zwischen den Sektoren, wenn sich die Energienachfrage im Nicht-ETS-Bereich von fossilen Brennstoffen hin zu Elektrizität verlagert. Zusätzlich wurden Angebotskurven für

grünes Gas und E-Fuels parametrisiert, um deren Beitrag zur Energieversorgung zu berücksichtigen.

Das Modell LEEM ist in ELECTRO_COUP Working Paper 1 beschrieben (Download: <https://www.cesarecon.at/language/en/downloads/>).

AP 2: Szenarioentwicklung

Das Ziel von AP2 besteht darin, Dekarbonisierungsszenarien für die Bereiche Verkehr und Wärme zu entwickeln, die verschiedene politische Maßnahmen, einschließlich Preisinstrumenten, umfassen. Bei der Entwurfsphase der Szenarien wird eine klare Unterscheidung zwischen technologischen Veränderungen und Investitionen vorgenommen, die die Dekarbonisierung technisch vorantreiben (die technische Perspektive), und politischen Instrumenten, die die Verbreitung der Technologien und Investitionen fördern.

Für beide Aspekte, die in der Szenarioerstellung oft als "Maßnahmen" zusammengefasst werden, wurden Erfahrungen, Erkenntnisse und Fachwissen aus dem ELECTRO_COUP Expertenbeirat (siehe AP5), von anderen Expert:innen und Stakeholdern sowie aus bestehenden Studien genutzt. Die Einbindung dieser umfassenden externen Expertise gewährleistet die Berücksichtigung verschiedener Perspektiven und Meinungen und stärkt somit die Qualität und Validität der entwickelten Szenarien.

Zunächst wurde ein Basisszenario entwickelt, das darauf ausgelegt ist, auf Basis bekannter, geplanter Maßnahmen, insbesondere im Raumwärme- und Verkehrssektor, das „100% erneuerbare Strom-Ziel“, zu erreichen. Es berücksichtigt keine zusätzliche Sektorkopplung, sondern illustriert die erwartete zukünftige Entwicklung, unter der Annahme, dass Richtlinien und Unterstützungsmaßnahmen, wie in FMST (2019)⁴ und IEA (2020)⁵ beschrieben, eingeführt werden. Das Basisszenario zeigt die Trends und die Dekarbonisierung der Stromerzeugung bis 2030 (CO₂-Preise im ETS) auf, geht jedoch von keiner Dekarbonisierung in Nicht-ETS-Sektoren aus.

Darüber hinaus haben wir drei „Dekarbonisierung 2040“-Szenarien entwickelt. Diese Szenarien zeigen weitere Pfade zur Elektrifizierung im Verkehrs- und Haushaltssektor und in anderen ausgewählten Nicht-ETS-Sektoren (Landwirtschaft, Bauwesen und Dienstleistungen) sowie zur Sektorkopplung bis 2040 als Beitrag zur weitestgehenden Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor auf.

⁴ FMST - Federal Ministry of Sustainability and Tourism (2019). Integrated National Energy and Climate Plan for Austria 2021-2030; pursuant to Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council on the Governance of the Energy Union and Climate Action.

⁵ IEA – International Energy Agency (2020). Austria 2020. Energy Policy Review. <https://www.iea.org/reports/austria-2020>

Um die unterschiedlichen Möglichkeiten der Dekarbonisierung zu verdeutlichen, haben wir die Szenarien in Bezug auf hohe und niedrige Systemeffizienz differenziert. Unter dem Aspekt **hoher Systemeffizienz** wird angenommen, dass sowohl im Wärme- als auch im Verkehrsbereich fossile Brenn- und Kraftstoffe durch Strom ersetzt werden. Gleichzeitig wird die Endenergienachfrage durch Effizienzsteigerungen und sozioökonomische Veränderungen erheblich reduziert.

Hinsichtlich der zusätzlichen Stromnachfrage aus den Nicht-ETS-Sektoren werden zwei unterschiedliche Entwicklungen untersucht: Das erste Szenario mit hoher Systemeffizienz geht davon aus, dass der zusätzlich benötigte Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt wird, wodurch das Ziel von 100% Strom aus erneuerbaren Quellen weiterhin erreicht wird. Das zweite Szenario mit hoher Systemeffizienz hingegen berücksichtigt den ungünstigsten Fall der Sektorkopplung, bei dem die gesamte zusätzliche Stromnachfrage durch fossile (Gas-)Stromerzeugung gedeckt wird. Diese Variante zeigt mögliche Herausforderungen auf, die mit einem verstärkten Einsatz von fossilbasiertem Strom einhergehen könnten. Diese Differenzierung ermöglicht es uns, zu verdeutlichen, dass die Dekarbonisierung auf mehr oder weniger (kosten-)effiziente Weise erreicht werden kann, abhängig von der gewählten Strategie und den eingesetzten Technologien.

Zusätzlich betrachten wir auch ein Szenario mit **geringer Systemeffizienz**, bei dem fossile Brennstoffe durch E-Kraftstoffe substituiert werden (indirekte Elektrifizierung). Anstatt Elektrizität direkt zu nutzen, wird eine andere Technologie verwendet, die auf elektrischer Energie als Energiequelle aufbaut.

Zusammenfassend wurden die folgenden drei Szenarien entworfen:

- **Dekarbonisierung 2040 – hohe Systemeffizienz1 (Decarb_high1):**
Hohe CO₂-Preise im ETS und Nicht-ETS führen zu Nachfrageänderungen aufgrund von Sanierungen und zu einer Verlagerung auf die Nutzung von Elektrofahrzeugen und CO₂-freien Heizsystemen, was eine Dekarbonisierung des Verkehrs- und Wärmesektors und die Erzeugung von zusätzlichem Strom aus erneuerbaren Energien nach sich zieht. Der zusätzlich benötigte Strom stammt zur Gänze aus erneuerbaren Energiequellen.
- **Dekarbonisierung 2040 – hohe Systemeffizienz2 (Decarb_high2):**
In diesem Szenario betrachten wir die Möglichkeit, Gas anstelle von erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung zu verwenden. Die Maßnahmen zur Dekarbonisierung in den Nicht-ETS-Sektoren werden beibehalten.
- **Dekarbonisierung 2040 – geringe Systemeffizienz (Decarb_low):**
Anstatt die Effizienz zu verbessern und direkt Strom zu nutzen, untersuchen wir die Option, fossile Brennstoffe durch E-Kraftstoffe zu ersetzen. Wir gehen davon aus, dass hohe CO₂-Preise im ETS dazu führen, dass in den Nicht-ETS-Sektoren E-Fuels (zu 90% importiert) eingesetzt werden.

Zusätzlich zu den Maßnahmen und Aktivitäten im Basisszenario analysieren diese Szenarien das Potenzial einer stärkeren Sektorkopplung und Dekarbonisierungs-

politik in den Nicht-ETS-Sektoren. Da es sich dabei um potenzielle inländische Verlagerungen zwischen Sektoren handelt, haben wir uns explizit mit den Herausforderungen befasst, die sich für das Ziel einer „100 % erneuerbaren Stromerzeugung“ und mit dem Risiko einer „schmutzigen“ Sektorkopplung ergeben.

In allen Szenarien sind die Maßnahmen zur Elektrifizierung und Sektorkopplung eng mit den Determinanten der Verlagerung der Energienachfrage hin zur Elektrizität verknüpft. Diese Determinanten, die erläutern, wie Elektrotechnologie fossile Brennstoffe substituieren kann, wurden in einer Partialanalyse von Brennstoffverlagerungen und Effizienzverbesserungen identifiziert (Link zu AP3: Bottom-up Modellierung). Die Ergebnisse dieser Teilanalyse wurden in das makroökonomische Modellsystem integriert (Link zu AP 1). Dadurch ist es möglich, sowohl die wirtschaftlichen Auswirkungen als auch die Gesamteffekte auf Energie und CO₂-Emissionen in einem konsistenten Modellrahmen zu quantifizieren. Diese umfassende Integration der verschiedenen Aspekte ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der Auswirkungen der Elektrifizierung und Sektorkopplung auf die Wirtschaft und die Umwelt.

Der Arbeitsablauf hinsichtlich der Entwicklung der Szenarien umfasste folgende Schritte:

- Festlegung der Ziele der Szenarien und Konkretisierung der Annahmen,
- Auswahl von Maßnahmen/Instrumenten zur erneuerbaren Stromerzeugung
- Auswahl zentraler technischer Parameter für die Technologieverbreitung im Transport- und Raumwärmebereich
- Auswahl und Quantifizierung politischer Instrumente zur Technologieverbreitung
- Überprüfung der Szenarien (Annahmen zu Instrumenten und Parametern) durch den Expertenbeirat und andere externe Expert:innen und Stakeholder.

Der gesamte Prozess der Szenarioerstellung wurde von einem Beirat und externen Expert:innen begleitet (siehe AP 5), um weiteren Input zu möglichen politischen Instrumenten sowie zu technischen Parametern der Technologiediffusion zur Dekarbonisierung zu erhalten.

Die Szenarien sind in ELECTRO_COUP Working Paper 2 zusammengefasst (Download: <https://www.cesarecon.at/language/en/downloads/>).

AP3: Bottom-up-Modellierung von Wärme und Mobilität

Das Bottom-up-Modell für Heizung ist eine angepasste Version des Invert-Modells verwendet, welche eine Mischung aus dem EE-Lab-Modell und einem Accountingansatz darstellt. In dieser Modellversion optimieren Agenten ihr Verhalten für ein bestimmtes Set von Energiepreisen nicht vollständig unter politischen Einschränkungen, sondern müssen als Gesamtheit (gesamter

Gebäudebestand) exogen vorgegebenen Ziele hinsichtlich der Anteile von Energieträgern sowie Energieeffizienzmaßnahmen treffen. Das Modell wurde getestet, um sicherzustellen, dass es in der Lage ist, die verschiedenen Szenarien im Projekt abzubilden. Für den Individual- und Güterverkehr werden einzelne Gleichungen angewendet, die sozioökonomische und technologische Variablen kombinieren (ähnlich den Vorgaben im TIMES-Modell).

Für die Kalibrierung der Modellparameter war es wichtig, technisches Wissen über Technologien auf einer angemessenen Bottom-up-Aggregationsebene einzubeziehen. Diese Technologien umfassen die Endenergienutzung (Mobilität und Wärme) sowie die Strom-/Wärmeerzeugung und Gasversorgung. Auf der Nachfrageseite haben wir die Rückwirkungen zwischen Brennstoffverlagerungen und Energieeffizienz berücksichtigt.

Bei der technoökonomischen Bewertung von Optionen der Emissionsminderung im **Wärmesektor** wurden der Energieeinsatz pro Energiedienstleistungseinheit (beheizte Bruttogrundfläche) und die damit verbundenen Technologie- und Investitionskosten für vier verschiedene Dekarbonisierungspfade des Wärmesektors geschätzt. Diese umfassen auf einer Achse zwei unterschiedliche Grade an Energieeffizienzpfaden, auf der anderen Achse (i) ein Szenario, das sich auf die Elektrifizierung mittels Wärmepumpen konzentriert, (ii) ein weiteres Szenario mit einem stärkeren Fokus auf E-Fuels (E-Gase und E-Kraftstoffe) und Biokraftstoffe (Biomethan und Bioöl). Diese Arbeit basiert auf Ergebnissen derzeit laufender europäischer Projekte und wird durch Literaturdaten ergänzt.

Im Rahmen der technoökonomischen Bewertung CO₂-neutraler **Güterverkehrstechnologien und -infrastruktur** wurden die erforderliche Energie pro Energiedienstleistungseinheit (Tonnenkilometer) und die damit verbundenen Technologiekosten für zwei verschiedene Dekarbonisierungsszenarien bewertet. Das erste Szenario konzentrierte sich auf die Elektrifizierung durch batteriebasierte E-Mobilität. Im zweiten Szenario wurden der Energiebedarf und die damit verbundenen Infrastrukturkosten (die vorgelagerten Infrastrukturkosten der Gasversorgung werden als Teil der in AP1 festgelegten Gaskosten berücksichtigt) für ein Szenario bewertet, das auf der Dekarbonisierung durch kohlenstoffneutrale Gase basiert.

Für das Bottom-up-Modell für den Individual- und Güterverkehr wurden die Ergebnisse eines Verkehrsmodells (NEMO⁶) und verfügbare Literatur verwendet, um disaggregierte Inputs für Technologien, Kapitalbestände und Energiebedarf in das makroökonomische IO-Modell abzuleiten.

In Bezug auf die technoökonomische Bewertung CO₂-neutraler **Personenverkehrstechnologien und -infrastruktur** wurde der Energiebedarf des privaten PKW-Verkehrs berechnet, basierend auf unterschiedlichen Trends des gesamten Fahrzeugbestands und der Bestandszusammensetzung (sozioökonomische Faktoren) sowie des Energiebedarfs pro Energiedienstleistungs-

⁶ Siehe https://www.itna.tugraz.at/assets/files/areas/em/NEMO_en_2022.pdf

einheit (Personenkilometer). Bei der Personenbeförderung wurden zwei Dekarbonisierungspfade unterschieden. Für den Individualverkehr wurden Sättigungseffekte bei der Fahrzeugakkumulation pro Haushalt umgesetzt. Auch hier konzentriert sich ein Szenario auf batteriebasierte E-Mobilität und das zweite auf gasbasierte Systeme, entweder wasserstoffbasierte E-Mobilität oder E-Methanbasierte Verbrennungsmotoren. Das abgeleitete Bottom-up Modell baut wiederum auf verfügbarer Literatur und Bottom-up-Daten des Verkehrsmodells NEMO auf.

Die Ergebnisse der Bottom-up Modellierung im Wärmesektor, im Güter- und im Personenverkehr werden auf die Treibstoffnachfrage in der Landwirtschaft und im Bauwesen sowie auf die Raumwärme in die Dienstleistungsbranchen übertragen.

Die angewandte Bottom-up Modellierung ist in ELECTRO_COUP Working Paper 3 beschrieben (Download: <https://www.cesarecon.at/language/en/downloads/>).

AP4: Modellierung der Szenarien und Analyse der Ergebnisse

Die Szenarien wurden mit einem integrierten Energiewirtschaftsmodell simuliert, um zu sehen, wie sie sich auf den Stromverbrauch, die Energieeffizienz, die CO₂-Emissionen und Wirtschaftskennzahlen (z.B. Bruttoinlandsprodukt – BIP und Beschäftigung nach Branchen) auswirken. Die Simulationen wurden bis zum Jahr 2040 durchgeführt.

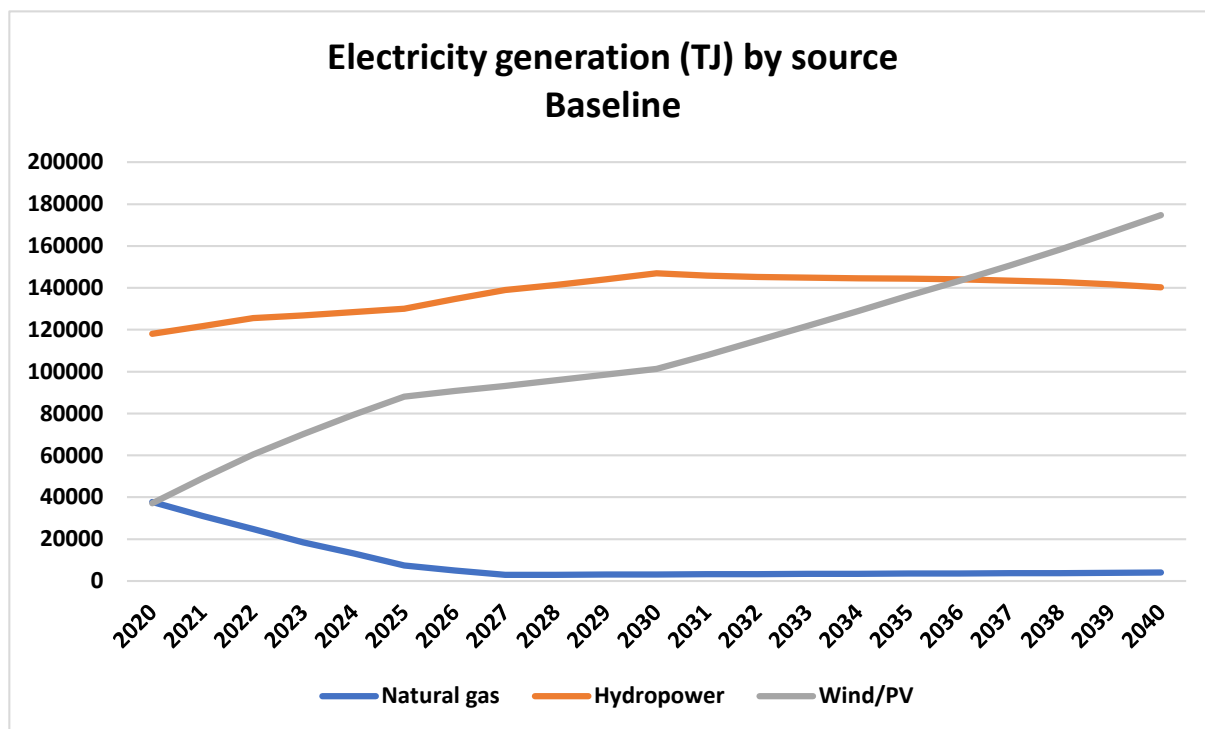
Nach den Berechnungen wurden die erzielten Ergebnisse analysiert und im Hinblick auf die Projektziele interpretiert. Besonderes Augenmerk lag auf den Effekten einer vollständigen Dekarbonisierung wichtiger Nicht-ETS-Sektoren sowie den Folgen einer verstärkten Elektrifizierung und Sektorkopplung. Dabei waren inländische Leakage-Effekte hinsichtlich Mengen und Preisen (Kosten für Emissionszertifikate) sowie Ergebnisse im Stromsektor von besonderem Interesse.

Im Folgenden werden exemplarisch einige wesentliche Resultate der Szenarien-Modellierung beschrieben. Ausführlich werden die Modellierungsergebnisse in ELECTRO_COUP Working Paper 4 dargestellt

(Download: <https://www.cesarecon.at/language/en/downloads/>).

Bereits im **Basisszenario**, das auf dem Ziel beruht, bis 2030 Strom zu 100% aus erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen, ist eine deutliche Dekarbonisierung zu erkennen. Abbildung 1 zeigt, dass bei der Stromerzeugung die Erdgasproduktion abnimmt, während Wind- und Photovoltaikanlagen stark ausgebaut werden und sich die Wasserkraft annähernd konstant entwickelt. Unter diesen Rahmenbedingungen wächst das BIP mit 2,0% p.a. und die gesamtwirtschaftliche Energieeffizienz (pro BIP-Einheit) steigt um 0,4% p.a., während die CO₂ Emissionen (wie es dem Trend seit 2005 entspricht) um ca. 1% p.a. zurückgehen.

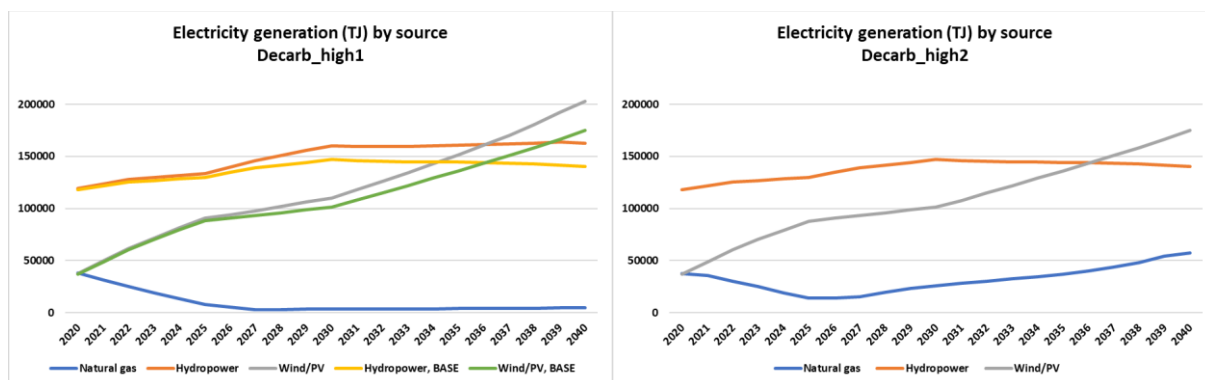
Abb. 1. Elektrizitätserzeugung nach Quellen im Basisszenario (in TJ)



Quelle: Eigene Berechnungen

Aus Abbildung 2 sind die Unterschiede der Kapazitätswüchse bei der Elektrizitätserzeugung in den **Dekarbonisierungsszenarien mit hoher Systemeffizienz** im Vergleich zueinander ersichtlich. Im Szenario „Decarb_high1“ steigen die Nutzung von Wind und PV sowie von Wasserkraft im Vergleich zum Basisszenario an, während die Gaserzeugung – wie im Basisszenario – bis 2030 auf null sinkt. Das Szenario „Decarb_high2“ hingegen nimmt neben der erhöhten Erzeugung von Wind und PV auch einen signifikanten Anstieg der Stromerzeugung aus Gas an. Dabei kommt es zu geringeren Investitionen im Elektrizitätssektor.

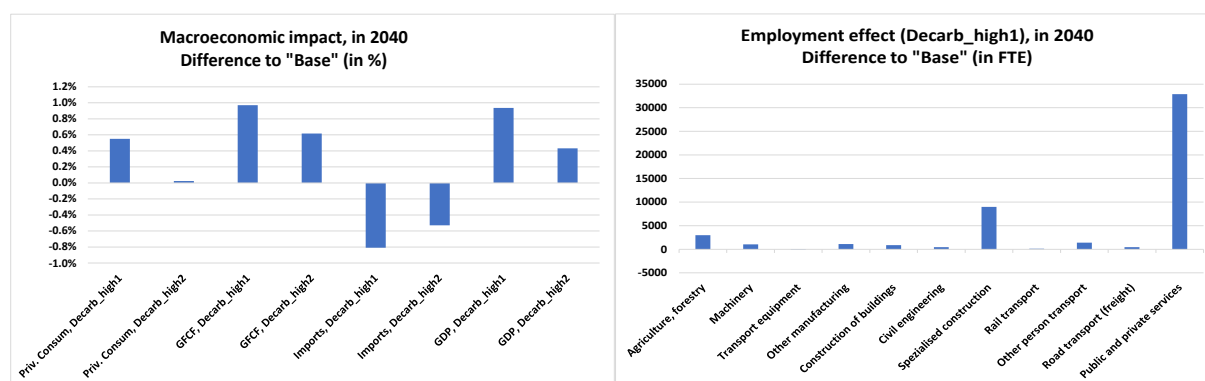
Abb. 2. Elektrizitätserzeugung nach Quellen in den Dekarbonisierungsszenarien mit hoher Systemeffizienz (in TJ)



Quelle: Eigene Berechnungen

In den beiden Szenarien mit hoher Systemeffizienz ist das BIP-Wachstum im Durchschnitt kaum höher, die gesamtwirtschaftliche Energieeffizienz steigt um 0,9 % p.a., in der Periode 2030 – 40 sogar um 1,4% p.a., was wesentlich durch den Effizienzeffekt der Elektrifizierung des Straßenverkehrs bedingt ist. Die kumulierte Differenz (in 2040) im BIP beträgt lediglich 0,5%, was durch die geringere Investitionstätigkeit im Stromsektor ausgelöst wird, die auch – über Multiplikatoreffekte – geringere Konsumeffekte induziert. Der Rückgang der Importe (hauptsächlich Energie) ist im Szenario „Decarb_high2“ ebenfalls geringer. Die Beschäftigungseffekte sind, was die Höhe und die Struktur betrifft (aufgrund der geringen Unterschiede in den makroökonomischen Effekten) sehr ähnlich (ca. 58.000 Vollzeitäquivalente) und konzentrieren sich auf den Dienstleistungsbereich (33.000 Vollzeitäquivalente) und das Baugewerbe (9.000 Vollzeitäquivalente). Ob diese Beschäftigungseffekte realisiert werden, hängt wesentlich vom verfügbaren Arbeitsangebot in den entsprechenden Berufen ab (was im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht wurde).

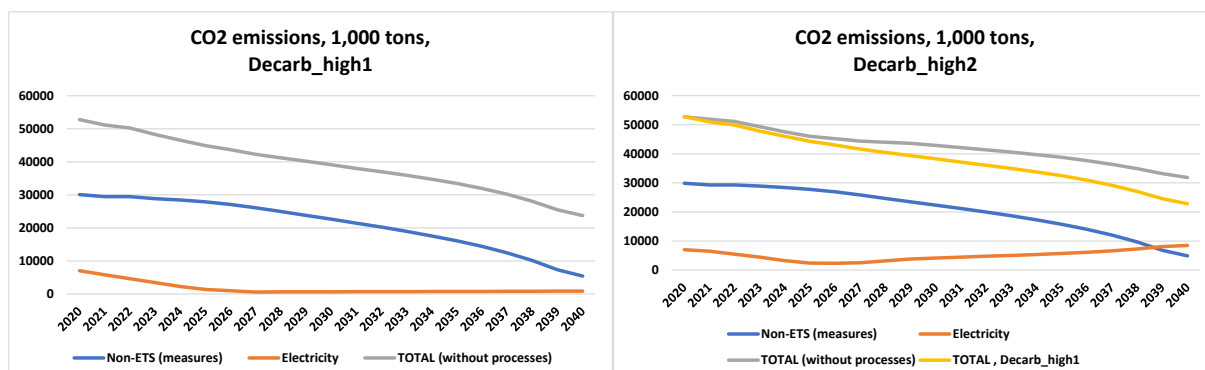
Abb. 3. Privater Konsum, Investitionen (GFCF), Importe, BIP und Beschäftigung in den Dekarbonisierungsszenarien mit hoher Systemeffizienz (Differenz, %, in 2040)



Quelle: Eigene Berechnungen

Im günstigsten Fall kann die für die Dekarbonisierung notwendige Strommenge mit erneuerbaren Inputs produziert werden (+28 PJ Wind/PV bis 2040). Im schlechtesten Fall wird die zusätzlich benötigte Elektrizität ausschließlich mit zusätzlicher Stromerzeugung aus Gas (+53 PJ Naturgas bis 2040) bereitgestellt. Dieser zweite Fall eines maximalen, negativen Sektorkopplungseffekts führt dazu, dass die CO₂-Emissionen aus Stromerzeugung im Jahr 2040 um 9 Mio. t ansteigen, wodurch 46% der Dekarbonisierung in dem von Maßnahmen erfassten Nicht-ETS wettgemacht werden. Abbildung 3 verdeutlicht den stärkeren Rückgang der CO₂-Emissionen im Szenario „Decarb_high1“ infolge des höheren Einsatzes an erneuerbarer Energie.

Abb. 4. CO₂ Emissionen in den Dekarbonisierungsszenarien mit hoher Systemeffizienz (in 1000 tons)



Quelle: Eigene Berechnungen

Aus den Modellierungsergebnissen lässt sich schließen, dass die politisch vorangetriebene Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor (CO₂-Preisgestaltung) zu einer Verbesserung der Energieeffizienz sowie zusätzlicher Elektrifizierung führt. Bereits das Basisszenario zeigt eine erhebliche Elektrifizierung in den Bereichen Wärme und Verkehr (Privat- und Güterverkehr), die in den Dekarbonisierungsszenarien noch verstärkt wird.

Der zusätzlich benötigte Strombedarf aus der Dekarbonisierung stellt nur einen Teil des Stromzuwachses im Basisszenario dar und kann im Szenario „Decarb_high1“ durch zusätzliche erneuerbare Stromerzeugung gedeckt werden.

Geht man vom „Worst Case“ der Sektorkopplung aus, d. h., der zusätzliche Strombedarf wird durch fossile (Gas-)Stromerzeugung gedeckt wird (Szenario „Decarb_high2“), verringern sich die Investitionen in erneuerbare Kapazitäten im Vergleich zum ersten Dekarbonisierungsszenario, während der Strompreis im Jahr 2040 um 20% aufgrund höherer Kosten für Emissionszertifikate ansteigt. Beide Effekte reduzieren auch die positiven Auswirkungen dieses Dekarbonisierungsszenarios im Vergleich zum Basisszenario.

Im Szenario **„Dekarbonisierung 2040 – niedrige Systemeffizienz“** (Decarb_low), indem fossile Kraftstoffe durch E-Fuels substituiert werden, erreicht einen ähnlichen Pfad der Emissionsreduktion wie die anderen beiden Szenarien, allerdings einhergehend mit höheren Kosten (Gesamtpreisniveau) und geringeren positiven wirtschaftlichen Auswirkungen. Das Szenario weist ein deutlich geringeres Einkommens- und Beschäftigungswachstum auf als die anderen Dekarbonisierungsszenarien, was auf höhere Strompreise (höhere Kosten für Emissionszertifikate) zurückzuführen ist.

Die vier inhaltlichen Arbeitspakete wurden durch zwei organisatorische Arbeitspakete ergänzt und unterstützt.

AP5: Einbindung von Stakeholdern und Expert:innen

Die Szenarioentwicklung und -modellierung wurde in einen Stakeholder-Prozess eingebettet, um den Forschungsprozess mit dem Wissen und den Erfahrungen ausgewählter Expert:innen und Stakeholder zu bereichern.

Die Einbeziehung der Stakeholder umfasste die Einrichtung eines Expertenbeirats, bestehend aus drei Personen, die im Rahmen einer Stakeholder-Analyse ausgewählt wurden. Die drei Experten wurden durch die Teilnahme an zwei Projektmeetings und zwei Workshops sowie das Lesen und Kommentieren von vier Working Papers in das Projekt eingebunden. Durch Interviews stellte der Beirat außerdem Informationen zu verschiedenen Technologien und Investitionskosten bereit, die für die Spezifikation der Modellparameter und die Gestaltung der Szenarien nützlich waren.

Im Rahmen der Stakeholder-Analyse wurde außerdem eine Gruppe von rund zehn Stakeholdern und Expert:innen ausgewählt, die zu den beiden Projektworkshops eingeladen wurde. Darüber hinaus wurden mehrere Fachleute konsultiert, um Informationen zu relevanten Szenarioannahmen zu erhalten.

Außerdem erfolgte mit zwei ACRP-finanzierten Projekten – NetZero2040 und TransFair-AT – ein Informationsaustausch, um Synergien und gemeinsame Forschungsmöglichkeiten zu erkunden.

AP6: Projektmanagement und Verbreitung

AP6 umfasst die Koordination (einschließlich Organisation von Meetings) und die Qualitätskontrolle des Projekts sowie die Verbreitung der Projektergebnisse (Dissemination).

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die im Projekt ELECTRO_COUP durchgeführte Szenarienanalyse zeigt, dass Effizienzsteigerungen in Verbindung mit direkter Elektrifizierung im Nicht-ETS-Sektor zu einer Dekarbonisierung mit nur geringen Sektorkopplungseffekten bei der Stromerzeugung führen können.

Durch die Analyse wurden folgende **Schlussfolgerungen** für die eingangs formulierten Forschungsfragen gezogen:

- Wie können die Elektrifizierung des österreichischen Mobilitäts- und Wärmesektors und die Sektorkopplung dazu beitragen, die österreichischen Dekarbonisierungsziele für 2030 und 2040 zu erreichen?

In den Dekarbonisierungsszenarien wird in den von den Maßnahmen betroffenen Sektoren des Nicht-ETS eine Reduktion der Emissionen um ca. 83% erreicht. Dabei werden der Güterverkehr, das Bauwesen und die Dienstleistungen fast vollständig

dekarbonisiert, während im Haushaltsbereich noch ein geringfügiger Einsatz von Treibstoffen und Gas verbleibt. Dafür wurde in den Bottom-up-Modellen implizit angenommen, dass diese auch aus erneuerbarer Stromerzeugung aufgebracht werden. Aus Gründen der Transparenz wurde diesen Energieeinsätzen jedoch dennoch ihr direkter CO₂-Ausstoß zugerechnet. Somit wird in den Dekarbonisierungsszenarien das Projektziel einer weitestgehenden Dekarbonisierung in signifikanten Nicht-ETS-Sektoren erreicht.

Im schlimmsten Fall gehen etwa 46% der Emissionsreduktion in den ausgewählten Nicht-ETS-Sektoren aufgrund intersektoraler Leakages verloren. Die Sektorkopplung führt zu höheren Strompreisen und geringeren positiven wirtschaftlichen Auswirkungen der Dekarbonisierung.

- Welche Auswirkungen sind auf Energie- und sozioökonomische Indikatoren (z. B. CO₂, Energieverbrauch und BIP nach Branche, Beschäftigung nach Branche, etc.) zu erwarten?

Die Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor ist mit gesamtwirtschaftlich relevanten Effekten verbunden: (i) Investitionseffekte, die positive Wirkungen wie erhöhte Investitionen in die thermische Sanierung und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, aber auch negative Effekte wie Rückgänge der Autokäufe aufweisen. (ii) Rebound-Effekte, die positive Auswirkungen aufgrund von Energieeinsparungen zeigen. (iii) Rückkopplungseffekte auf die Nachfrage, die durch den Strompreis entstehen. Die Effekte (i) und (ii) wirken positiv, der Effekt (iii) dämpft die positiven Wirkungen im Falle der Sektorkopplung mit fossiler Stromerzeugung.

Die jährlichen BIP-Wachstumsraten der beiden Dekarbonisierungsszenarien mit hoher Systemeffizienz liegen nur geringfügig über jener des „Baseline“-Szenarios. Im günstigeren Fall einer Dekarbonisierung mit hoher Systemeffizienz und einem Sektorkopplungseffekt für erneuerbare Stromerzeugung (bedeutet höhere Investitionen in die Stromerzeugung) beträgt der kumulierte Unterschied in 2040 ca. 1%. Der kumulierte Beschäftigungseffekt (gegenüber dem „Baseline“-Szenario) ist in beiden Dekarbonisierungsszenarien in etwa gleich hoch (+58.000 Vollzeitäquivalente).

- Wie viel zusätzlicher Strom wird benötigt, um den Stromsektor mit Verkehr und Wärme zu koppeln, und wie wird dieser zusätzliche Strom angesichts der ETS-Obergrenzen und -Preise bereitgestellt?

Der zusätzliche Strombedarf durch die Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Sektor beträgt gegenüber dem „Baseline“ 280 PJ, also lediglich um ca. 40% mehr als der Zuwachs im Basisszenario und kann bei Dekarbonisierung mit hoher Systemeffizienz durch zusätzliche erneuerbare Erzeugung gedeckt werden. Geht man vom „Worst Case“ der Sektorkopplung aus, indem der zusätzliche Strombedarf durch fossile (Gas-)Stromerzeugung gedeckt wird, sind die Investitionen in erneuerbare Kapazitäten geringer als im ersten

Dekarbonisierungsszenario und der Strompreis steigt bis 2040 um 20% aufgrund höherer Kosten für CO₂-Zertifikate.

- Welche Instrumente können empfohlen werden, um effiziente Speichertechnologien und die Durchdringung des Stromsektors mit erneuerbaren Energien bei der Deckung des zusätzlichen Strombedarfs zu unterstützen?

Wie bereits im Kapitel 3 angeführt, wurde diese Frage mithilfe der Studie des Potsdam-Instituts (Pietzcker et al. 2021⁷) analysiert. Aufgrund des kontinuierlich steigenden CO₂-Preises ist zu erwarten, dass zukünftig nur noch Investitionen in erneuerbare Stromerzeugung wirtschaftlich rentabel sein werden. Dies geht damit einher, dass auch begleitende Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung, einschließlich Netzausbau und effizienter Speichertechnologien, entsprechend umgesetzt werden müssen.

Ein Instrument, das heute den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung forciert, ist das Marktprämie-System, welches durch das Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG⁸) in Österreich eingeführt wurde und die bisherigen festen Einspeisetarife des Ökostromgesetzes ablöste. Das Ziel der Marktprämie ist es, die Differenz zwischen den Produktionskosten von erneuerbarem Strom und dem durchschnittlichen Marktpreis für Strom auszugleichen.

Die Marktprämie erscheint aus Sicht der Autor:innen ein geeignetes Instrument zu sein, um die Durchdringung des Elektrizitätssektors mit erneuerbaren Energien zu fördern und auch die Umsetzung von effizienten Speichertechnologien zu erleichtern. Dies erfordert jedoch eine ausreichend hohe „Marktprämien“-Vergütung.

In diesem Zusammenhang besteht die zentrale technische Herausforderung darin, die unregelmäßige Energieerzeugung aus schwankenden Quellen effektiv mit dem Bedarf der Verbraucher abzustimmen, um eine wirtschaftliche und bedarfsgerechte Versorgung mit Strom und Wärme zu gewährleisten. Energiespeicher spielen eine entscheidende Rolle, da sie die zeitliche Entkoppelung von Energieerzeugung und Verbrauch ermöglichen und somit als Schlüsseltechnologien wichtige Aufgaben im zukünftigen Energiesystem übernehmen können. Speicherlösungen sollten jedoch nicht isoliert betrachtet werden, sondern als Teil einer umfassenden Lösung, die eng mit anderen Maßnahmen interagiert (AIT, 2019⁹). Pumpspeicherkraftwerke sind in Österreich derzeit und auch zukünftig die wichtigste Option zur Netzstabilisierung und zur

⁷ Pietzcker, R. et al. (2021). Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector.

⁸ Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz – EAG) StF: BGBl. I Nr. 150/2021 (NR: GP XXVII RV 733 AB 982 S. 115. BR: 10690 AB 10724 S. 929.) <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011619>

⁹ AIT (2019). Netzdienlicher Einsatz von elektrischen Speichersystemen. Anwendungsfälle, Systemintegration, Organisation.

Speicherung von erneuerbaren Energien. AIT et al. 2022¹⁰ empfehlen daher die Steigerung der Turbinen- und der Pumpleistung. Die Autoren der Studie betonen außerdem die zentrale Bedeutung des überregionalen und transnationalen Stromaustauschs über Übertragungsnetze als eine wesentliche Flexibilitätsquelle im heimischen Strommarkt. Dies ermöglicht den großflächigen Ausgleich regionaler Überschüsse und Defizite in der Stromproduktion.

Sowohl techno-ökonomische Fortschritte (wie Kostenreduktion, Lebensdauer-Verlängerung, höhere Effizienz und Sicherheit) als auch der Abbau von wirtschaftlich-regulatorischen Barrieren, wie regulatorischen Hürden und Marktzugangsproblemen stellen große Herausforderungen für die Energiespeicherbranche dar (EC 2023¹¹). Beispielsweise werden derzeit in Österreich Speicher doppelt besteuert, einmal beim Einspeichern der Energie als Verbraucher, ein zweites Mal beim Ausspeichern als Erzeuger. Dieses Problem sollte mit dem neuen Elektrizitätswirtschaftsgesetz gelöst werden. Des Weiteren stehen Großprojekte zum Ausbau der Energieinfrastruktur häufig im Konflikt mit örtlichen Interessensvertretungen, wodurch bei diesen Projekten mit langen Genehmigungsverfahren zu rechnen ist. Einige aktuelle Beispiele in Österreich sind u.a. die geplanten Pumpspeicherkraftwerken (geplante Inbetriebnahme Stand 2014¹² jeweils in Klammer gesetzt): Koralm (2021), Jochenstein/Riedl (2019), Ebensee (2017), Tauernmoos (2018) oder Molln (2019), oder auch die 380kV-Leitung in Salzburg. Eine Verfahrensbeschleunigung wichtiger Infrastrukturprojekte unter Einhaltung der Rechte aller Beteiligten kann aus Sicht der Autor:innen einen wesentlichen Beitrag für den Ausbau der notwendigen Energiespeicher zur Umsetzung der Energiewende leisten. Dieser Aspekt wurde in der aktuellen Novelle des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes (UVP-G) aufgenommen und sollte damit zukünftig dazu führen, dass große Infrastrukturprojekte im Bereich der Energiespeicherung schneller und einfacher umgesetzt werden können.

Erkenntnisse und Empfehlungen Eine bedeutende Erkenntnis der Szenarioarbeit ist die umsichtige Behandlung potenzieller Sektorkopplungsaspekte in klimapolitischen Szenarien. Obwohl diese Effekte in vielen Modellen (z. B. CGE-Modellen) implizit berücksichtigt werden, werden sie normalerweise nicht separat als eigene Ergebnisse dargestellt. Ein verbessertes Verständnis der Sektorkopplung kann auch zu einer präziseren Spezifizierung anderer Rückkopplungsmechanismen in der Klimapolitik führen. Diese Aspekte weisen auf

¹⁰ AIT, FFE, TU Wien (2022). Flexibilitätsangebot und -nachfrage im Elektrizitätssystem Österreichs 2020/2030. Flexibilitätsstudie im Auftrag der E-control.

¹¹ European Commission, Directorate-General for Energy, Hoogland, O., Fluri, V., Kost, C. et al., Study on energy storage, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/333409>

¹² WWF (2014). ÖKOMASTERPLAN STUFE III, Schutz für Österreichs Flussjuwelen, 2014, https://www.zobodat.at/pdf/WWF-Studien_72_2014_0001-0112.pdf

mögliche Synergieeffekte des aktuellen Projekts mit anderen internationalen Projekten hin.

Ein wesentliches Ergebnis für die energie- und klimapolitische Modellierung ist die Notwendigkeit, sektorale Zusammenhänge über Mengen, Preise und politische Instrumente zu berücksichtigen. Die bisherige Praxis der isolierten Politikanalyse des ETS (einschließlich Stromerzeugung) und des Nicht-ETS ist nicht ausreichend. Es ist entscheidend, die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sektoren zu berücksichtigen, um effektive und zielgerichtete Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Energiesystems zu entwerfen.

Das in diesem Projekt entwickelte und angewandte Modell berücksichtigt explizit die komplexen und vielfältigen Verflechtungen zwischen den Branchen der österreichischen Wirtschaft und deren Wechselwirkung mit dem Energiesystem. Durch die Integration von Finanzierungsmethoden und politischen Maßnahmen, die für die Erreichung der gesetzten Projektziele sinnvoll erscheinen, können sowohl positive als auch negative Auswirkungen eines Übergangs zur Dekarbonisierung identifiziert werden. Das Modell ermöglicht somit eine umfassende Analyse und Bewertung verschiedener Handlungsoptionen zur Förderung einer nachhaltigen und kohlenstoffarmen Wirtschaft in Österreich.

Die detaillierte Modellierung wichtiger Bereiche des österreichischen Energiesystems kann verschiedenen Interessengruppen dabei helfen, ihren Fokus auf spezifische Themen wie Elektrifizierung, Sektorkopplung und Verlagerungen zwischen Sektoren in Österreich zu richten. Dadurch können relevante Ergebnisse und Erkenntnisse über die sozioökonomischen Auswirkungen und das Potenzial der Dekarbonisierung in diesen Bereichen gewonnen werden. Das Forschungsprojekt liefert den Zielgruppen (Politikern, Stakeholdern und wissenschaftlichen Expert:innen) somit eine fundierte Informationsbasis für die Gestaltung wirksamer politischer Maßnahmen zur Unterstützung der Dekarbonisierung der österreichischen Wirtschaft und Gesellschaft. Es werden Strategien entwickelt, die den Ausbau der Sektorkopplung und die Elektrifizierung des Verkehrs- und Gebäudesektors vorantreiben sollen.

Das entwickelte Modellsystem bietet vielfältige Möglichkeiten für weitere Anwendungen. Es können komplexe Szenarien simuliert werden, um Fragestellungen in den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Sozialforschung detailliert zu untersuchen. Die abgeleiteten Kosten- und Energieeinsatzdaten pro Energiedienstleistungseinheit (beheizte Bodenfläche, Tonnen- und Personenkilometer) in den verschiedenen Szenarien liefern wichtige Elastizitäten, die in anderen makroökonomischen Modellen verwendet werden können. Diese Flexibilität ermöglicht eine breite Palette von Forschungsanwendungen und bietet die Möglichkeit, zukünftige Entwicklungen und politische Maßnahmen zu analysieren und zu bewerten.

Die erzielten Ergebnisse können auf andere Szenarioarbeiten sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene übertragen werden. Dies ermöglicht eine breite Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in verschiedenen Kontexten und

Ländern. Eine unmittelbare Folge und Fortsetzung des Projekts ist die Verfeinerung und Weiterentwicklung von Bottom-up-Modellierungswerkzeugen für den Individual- und Güterverkehr. Durch die Integration wirtschaftlicher und soziodemografischer Aspekte mit Technologieaspekten entsteht eine solide Grundlage für die Bewertung eines Policy-Mix zur Dekarbonisierung. Dies führt zu vertieften Erkenntnissen über die relative Bedeutung sozioökonomischer und technologiepolitischer Instrumente und deren Auswirkungen auf die Bemühungen zur Dekarbonisierung. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten somit eine wertvolle Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten und politische Entscheidungen im Bereich der Klimapolitik.

Es ist jedoch wichtig, die Grenzen der Analyse zu berücksichtigen. Die Studie konzentriert sich auf ein Land (Österreich), ohne die Rückkopplungen zum und vom EU-Zertifikatemarkt zu betrachten. Außerdem werden in der Analyse die Technologieentscheidungen im Stromsektor nicht explizit modelliert, und wichtige ergänzende Technologien wie die Energiespeicherung bleiben unberücksichtigt. Die Beachtung dieser Einschränkungen in künftigen Analysen kann ein umfassenderes Verständnis der Auswirkungen der Sektorkopplung ermöglichen.

C) Projektdetails

6 Methodik

Methodisch basiert das Projekt ELECTRO_COUP auf einer modellgestützten Szenarioanalyse. Es umfasst die Entwicklung verschiedener Szenarien sowie die Entwicklung eines Modells zur Simulation dieser Szenarien für Österreich bis 2040. Die Forschung ist in einen Stakeholder-Prozess eingebettet, der die Wissensbasis um die Erfahrungen und Kenntnisse von ausgewählten Expert:innen erweitert.

Das im Projekt entwickelte Modell kombiniert einen makroökonomischen Ansatz mit bottom-up Wissen. Die Konstruktion des Modells sieht explizit die Einbeziehung der Sektorkopplung und die Abbildung sektoraler Leakages vor und arbeitet auf einem mittleren Disaggregationsniveau. Die Szenarioanalyse deckt bisher vernachlässigte Rückkopplungsmechanismen auf und quantifiziert deren relative Bedeutung für eine erfolgreiche Dekarbonisierung.

Die Modellierung sektorübergreifender Zusammenhänge ist für die Analyse des Übergangs vom aktuellen auf fossilen Brennstoffen basierendem Energiesystem zu einem erneuerbaren Energiesystem (Pavičević et al. 2020¹³) von großer Relevanz und wird daher im vorliegenden Projekt berücksichtigt. Zu diesem Zweck ist es auch wichtig, Ingenieurwissen über Technologien zur Kalibrierung von Modellparametern auf einer angemessenen Bottom-up-Aggregationsebene einzubeziehen. Diese Technologien umfassen (i) die Endenergienutzung (Mobilität und Wärme) sowie (ii) die Strom-/Wärmeerzeugung und die Gasversorgung. In (i) müssen die Rückwirkungen zwischen Brennstoff-verlagerungen und Energieeffizienz spezifiziert und bei der Wahl zwischen Technologieoptionen berücksichtigt werden. Die Analyse von (ii) zeigt das realistische Potenzial der Sektorkopplung in einem Dekarbonisierungsszenario.

Das makroökonomische Modell integriert das Energiesystem vollständig und befasst sich explizit mit verschiedenen Arten von Verknüpfungen: (i) Input-Output (IO)-Verknüpfungen in der Produktion und (ii) Energienachfrage-verknüpfungen zwischen ETS und Nicht-ETS. Das Modell disaggregiert daher die aus klimapolitischer Sicht wichtigsten Sektoren: mehrere energieintensive Industrien (ETS), Strom- und Wärmeerzeugung (ETS), nicht energieintensive Industrien (nicht-ETS), Mobilität von Haushalten (nicht-ETS) und Beheizung von Haushalten (nicht-ETS). Für die nicht energieintensiven Industrien im Nicht-ETS-Bereich werden Energiebedarf und Technologien ebenfalls in Wärme und Mobilität aufgeteilt, wie im Haushaltssektor.

¹³ Pavičević, Mm., Mangipinto, A., Wouter, N., Lombardi, F., Kavvadias, K., Navarro, J.P.J., Colombo, E., Quoilin, S. (2020). The potential of sector coupling in future European energy systems: Soft linking between the Dispa-SET and JRC-EU-TIMES models, Applied Energy, Volume 267, 2020, 115100, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115100>.

Die vollständige Integration des Energiesystems in ein makroökonomisches IO-Modell gewährleistet, dass alle Änderungen im Energiesystem konsistente Auswirkungen auf die Wirtschaft haben, sowohl auf der Ebene der Mengen als auch der Kosten und Preise (Kratena und Scharner, 2020¹⁴). Die IO-Verknüpfungen in (i) umfassen daher sowohl Mengen- als auch Preisverknüpfungen.

Das Modell beschreibt die Volkswirtschaft eines EU-Landes (Österreich), das versucht, mithilfe eines Policy-Mix Emissionsziele für Nicht-ETS-Sektoren zu erreichen. Die Dynamik des Wirtschaftswachstums wird durch die Produktivitätsentwicklung aller Faktoren (Kapital, Arbeit, Energie) mit einer Rückwirkung auf die preisliche Wettbewerbsfähigkeit (Importe und Exporte) angetrieben. Der Zertifikatspreis im ETS ist exogen (Annahme eines kleinen Landes), die Kosten für Zertifikate hängen jedoch von der nationalen Überschussnachfrage nach Zertifikaten ab und sind ein wichtiger Bestandteil bei der Preisfestsetzung der vom ETS abgedeckten Branchen. Daher sind Produktivitätsentwicklungen, Lohnsetzung, globale Energiepreise und Zertifikatskosten die Haupttreiber der preislichen Wettbewerbsfähigkeit und der Verlagerung von CO₂-Emissionen ins Ausland. Die Strompreise werden durch ein formalisiertes Merit-Order-Preismodell beschrieben, das die Emissionsobergrenze und die Genehmigungskosten berücksichtigt. Inländische CO₂-Verlagerungen treten auf, wenn sich die Energienachfrage im Nicht-ETS-Bereich von fossilen Brennstoffen hin zu Elektrizität verlagert.

Die Datengrundlage für diese Analyse bilden Input-Output-Tabellen, Energiebilanzen und die Nutzenergieanalyse (NEA; Zeitreihe 1993 – 2016). Der letztgenannte Datensatz enthält wertvolle technologische Informationen über die Sektoren hinweg, aus denen das Nicht-ETS besteht. Die NEA-Daten ermöglichen die Analyse der Trends in der Energieträgerstruktur in jedem Sektor als Produkt der Entwicklung der im vorgeschlagenen Projekt analysierten Nutzenergiekategorien (Raumwärme und Verkehr) und der Substitution zwischen Energieträgern innerhalb jeder Nutzenergiekategorie. Hierzu werden die Daten der Nutzenergieanalyse in ökonometrische Modelle integriert und die Ergebnisse auf die Sektorebene übertragen. Daraus ergibt sich ein Analysemodell für den Energiebedarf nach Energieart und Sektor, welches die Berechnung unterschiedlicher Pfade der Elektrifizierung und Sektorkopplung in den Szenarien ermöglicht.

Die entwickelten Szenarien orientieren sich an politischen Rahmenbedingungen und Zielen der EU und Österreichs. Insofern basieren die Dekarbonisierungsszenarien auf ehrgeizigeren Zielvorgaben (z.B. CO₂-Neutralität im Jahr 2040). Die Szenarioannahmen (z. B. Entwicklung der CO₂-Preise und des Investitionsbedarfs) wurden aus bestehenden Szenarien abgeleitet und beziehen explizit Aspekte der Sektorkopplung und sektoralen Leakages mit ein. Da kein Modell des Stromsektors

¹⁴ Kratena, K. and A. Scharner (2020) MIO-ES: A Macroeconomic Input-Output Model with Integrated Energy System, Centre of Economic Scenario Analysis and Research (CESAR), Vienna 2020, available at: https://www.cesarecon.at/wp-content/uploads/2020/10/MIOES_Manual_Public_FINAL.pdf

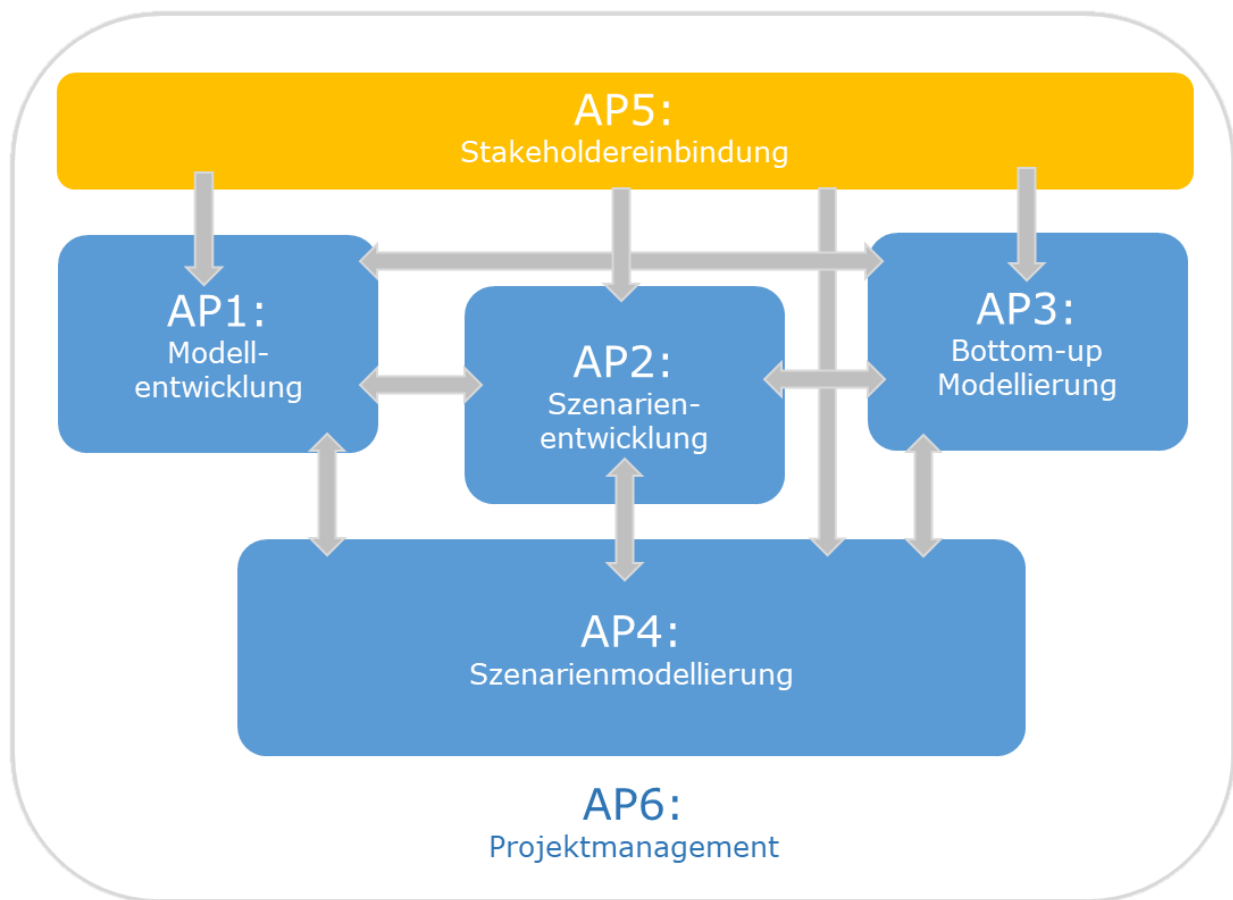
angewendet wurde, stammen die Informationen zur Erzeugung nach Technologie, Kapazitätserweiterungen und Außenhandel mit Strom für das Basisszenario von Pietzcker et al. (2021¹⁵), wobei nicht nur die publizierte Studie, sondern auch empirische Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Elektrizitätssektor-Modell LIMES-EU zur Verfügung standen. Für die Gestaltung von Dekarbonisierungspfaden in den Bereichen Wärme und Verkehr wurde auf vorhandenes Wissen aus anderen Szenarien zurückgegriffen. Dazu gehört die Nutzung von Bottom-up-Daten, -Funktionen und -Modellen, die den Rahmen bilden, innerhalb dessen bestimmte Annahmen die Entwicklung der Endenergie je Energieart steuern.

Bei der Entwicklung, Modellierung und Bewertung der Szenarien wurden ausgewählte Stakeholder (Expert:innen und Interessenvertreter:innen) aus dem Bereich Energiepolitik und -versorgung aktiv in die wissenschaftliche Arbeit eingebunden, um den Forschungsprozess um ihr Wissen und ihre Erfahrungen zu bereichern. In diesem Sinne war es beispielsweise möglich, zusätzliches Ingenieurwissen über verschiedene Technologien zur Kalibrierung von Modellparametern zu integrieren sowie Informationen über die Investitionskosten zu erhalten. Die Einbindung externer Expert:innen trug außerdem dazu bei, dass den Szenarien eine geeignete Auswahl politischer Maßnahmen und Instrumente zugrunde liegt. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Verbindung von Wissenschaft und Praxis, indem es den Dialog zwischen Stakeholdern und Wissenschaftlern fördert und die Transparenz der Modellierung erhöht.

7 Arbeits- und Zeitplan

Das Projekt ELECTRO_COUP dauerte 21 Monate und wurde von Anfang Oktober 2021 bis Ende Juni 2023 bearbeitet. Zunächst wurden die Arbeitspakete (AP) 1-3 bearbeitet (Modellentwicklung, Szenarienentwicklung, Bottom-up Modellierung), um danach im Arbeitspaket 4 die entwickelten Szenarien zu modellieren und zu evaluieren. Außerdem wurde das Projekt über die gesamte Laufzeit durch einen Stakeholderprozess (Arbeitspaket 5) begleitet.

¹⁵ Pietzcker, R. et al. (2021). Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector.



8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

Deliverables	
D 1.1	Working Paper 1 (Modelldokumentation)
D 2.1	Working Paper 2 (Szenarientwicklung)
D 3.1	Working paper 3 (Bottom-up Modellierung)
D 4.1	Working Paper 4 (Modellierungsergebnisse)
D 6.1	Website
D 6.2	Factsheet 1 (in englischer Sprache)
D 6.3	Factsheet 2 (in deutscher Sprache)
D 6.4	Policy brief
D 6.5	Journal paper zum Modellierungsansatz (in Arbeit)
D 6.6	Journal paper zu den Ergebnissen (in Arbeit)

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.