

## INFRA-ENSURE

Tackling uncertainties post-2030: cross-sectoral infrastructure demands to ensure the Austrian "Klimawende"

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Austrian Climate Research Programme 2024	<b>Status</b>	laufend
<b>Projektstart</b>	01.10.2025	<b>Projektende</b>	31.03.2028
<b>Zeitraum</b>	2025 - 2028	<b>Projektlaufzeit</b>	30 Monate
<b>Keywords</b>	Net-zero Transformation; Infrastruktur; Finanzierungsbedarf Klimawende; Integrierte Planung; Makroökonomische Bewertung		

### Projektbeschreibung

Motivation und angestrebte Ergebnisse. Die kürzlich veröffentlichten Pfade zur österreichischen Klimaneutralität stimmen in hohem Maße in den kurzfristigen Anforderungen überein: erhebliche Ausweitung erneuerbarer Energien, Umstellung auf Elektroantriebe, Umstellung auf Heizsysteme auf Basis erneuerbarer Energien (insbesondere Wärmepumpen) und auf erneuerbare Produktionstechnologien in der Industrie. Längerfristig – über 2030 hinaus – weichen diese Studien jedoch weit voneinander ab, was auf entscheidende Unsicherheiten hindeutet, und lassen blinde Flecken. INFRA-ENSURE soll diese Lücken schließen, No-regret Maßnahmen ermitteln und politische Implikationen ableiten. Insbesondere die langen Planungs- und Bauzeiten für Infrastrukturen erfordern eine frühzeitige Entscheidungsfindung, um ihre rechtzeitige Verfügbarkeit und die Ausrichtung auf die Ziele der Klimaneutralität sicherzustellen. INFRA-ENSURE wird die über verschiedene Pfade hinweg gemeinsamen Infrastrukturanforderungen zusammenfassen und so eine solide Entscheidungsgrundlage liefern und die relativen Vorteile, plausiblen Größenordnungen und die Sequenz der Investitionsanforderungen der wichtigsten Alternativen untersuchen.

Die mittel- und langfristigen Unsicherheiten betreffen vier miteinander verbundene Dimensionen. Erstens gehen die bestehenden Netto-Null-Emissions-Studien in Bezug auf den langfristigen Energiebedarf und das Potenzial für Einsparungen in hard to abate industries auseinander. Zweitens decken die Modellierungsansätze, die bei der Szenarioentwicklung für Österreich verwendet werden, die Netze nicht ausreichend ab, d. h. sie berücksichtigen entweder nicht die Strom-, Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Gasnetze im Energieversorgungssystem oder verwenden keine integrierten Ansätze zur Modellierung von Investitionsentscheidungen. Diese Einschränkungen sind jedoch von großer Bedeutung und können zu erheblichen Änderungen bei der optimalen Konfiguration des Energiesystems führen. Drittens weichen die Ausbaupotenziale für erneuerbaren Strom und für die Erzeugungstechnologien, auch in der erforderlichen Geschwindigkeit, voneinander ab. Während die meisten bestehenden Modelle einen höheren Ausbau der Windenergie vorhersagen, zeigt die beobachtete Entwicklung in den letzten Jahren einen schleppenden Ausbau der Windenergie und einen beschleunigten Einsatz von Photovoltaik. Viertens werden die Potenziale für eine Reduzierung der Materialnachfrage in einer Kreislaufwirtschaft und die entsprechenden Auswirkungen auf die Energienachfrage nur unzureichend behandelt, oft nur in einem allgemeinen Kontext ohne konkrete Spezifikationen oder Quantifizierungen.

Um das Verständnis der Entwicklungspfade nach 2030 und des entsprechenden Infrastrukturbedarfs zu verbessern, ist daher

eine systematische und umfassende Bewertung aller beteiligten Energieverbrauchssektoren erforderlich, was wiederum die Weiterentwicklung modernster Energiesystemmodelle in Kombination mit Tools erfordert, die in der Lage sind, gesamtwirtschaftliche Effekte zu erfassen. Diese Bewertung wird INFRA-ENSURE durchführen.

Ziel. Das übergeordnete Ziel von INFRA-ENSURE besteht darin, Quantifizierungen und politikbezogene Schlussfolgerungen abzuleiten, die wichtige politische Maßnahmen, insbesondere im Zusammenhang mit Entscheidungen zur Infrastrukturentwicklung, erheblich stärken und verbessern können. Die Mittel, um dieses Ziel zu erreichen, sind:

- Schaffung eines methodisch soliden Rahmens für die transparente und reproduzierbare Analyse nationaler Defossilisierungsszenarien durch die Integration und Weiterentwicklung modernster Modelle des Energiesektors und der gesamtwirtschaftlichen Interaktion.
- Bewertung der Machbarkeit, Konsistenz und gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Bandbreite sektorübergreifender Netto-Null-Emissionspfade mit hoher zeitlicher und mittlerer räumlicher Auflösung für Österreich und damit Verringerung der Unsicherheiten in bestehenden Szenarien.
- Bereitstellung solider, transparenter und fundierter Vorschläge für die österreichische Infrastrukturentwicklung mit detaillierten Erkenntnissen über den Infrastrukturbedarf, genaueren Schätzungen des Investitionsbedarfs, einschließlich ihrer No-Regret-Segmente, und einem besseren Verständnis der makroökonomischen Auswirkungen sowohl angebotsseitiger Interventionen als auch nachfrageseitiger Maßnahmen und struktureller Veränderungen auf Wirtschaftswachstum, Wertschöpfung, Emissionen und Handelsbeziehungen.
- Stärkung des sektorübergreifenden Verständnisses und Erleichterung der Zusammenarbeit zwischen den Stakeholdern und politischen Entscheidungsträgern im Bereich der Klimaneutralität in Österreich.

Methodischer Ansatz: Das Projekt ist strukturiert und iterativ aufgebaut und folgt einem robusten, modellbasierten und gemeinsam entwickelten Bewertungsansatz für sektorübergreifende Defossilisierungsszenarien und die entsprechenden politischen Anforderungen für Österreich nach 2030. Das Arbeitspaket 1 hat neben dem traditionellen Projektmanagement eine kontinuierliche Projektevaluierung mit Interessengruppen und internationalen wissenschaftlichen Expert:innen im Fokus. Das Arbeitspaket 2 erstellt eine Reihe konsistenter, sektorübergreifender Defossilisierungspfade für Österreich, die über die derzeitigen Ansätze hinausgehen und den großen Unsicherheitsbereich nach 2030 deutlich reduzieren. Diese Szenarien werden in WP3 innerhalb eines Modellierungsrahmens evaluiert, der ein detailliertes Energiesystemmodell (aus WP4) mit einem makroökonomischen CGE-Modell (aus WP5) verknüpft. Auf der Grundlage der Modellergebnisse werden wir in WP6 politische Empfehlungen ableiten, einschließlich No-Regret-Infrastrukturinvestitionspfaden, und die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Öffentlichkeit und der wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich machen.

Unser integrierter Modellrahmen verknüpft ein europaweites, sektorgekoppeltes Energiesystemmodell (PyPSA-EUR) mit einem makroökonomischen angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodell (CGE) Österreichs. PyPSA-EUR bietet mit seiner hohen zeitlichen und mittleren räumlichen Auflösung eine ausreichend hohe Auflösung der entscheidenden Grundlagen, um die erforderliche Netz- und Pipeline-Infrastruktur bewerten zu können. Außerdem deckt es alle Sektoren des Energiebedarfs ab. Wir erhöhen die Auflösung der Darstellung des österreichischen Energiesystems und integrieren es konsistent in die europaweite Übertragungsnetz- und Pipeline-Infrastruktur. Bestehende österreichische Szenarien weisen dieses Merkmal nicht auf. Entscheidend ist, dass wir durch die Kopplung des Energiemodells mit dem CGE-Modell untersuchen können, wie sich Veränderungen im Energiesystem und in den Wirtschaftssektoren (z. B. Stahl, chemische Industrie, Transport, Zement) auf die gesamtwirtschaftlichen Indikatoren, die Verteilung und den Wohlstand auswirken.

Innovationsgrad. Wir gehen in vierfacher Hinsicht über den Stand der Technik bei der Modellierung von Defossilisierungspfaden für Österreich hinaus, und in jedem dieser Bereiche erweitert der methodische Ansatz auch die internationale Forschungsgrenze:

- Fokus auf den Zeitraum nach 2030 und die damit verbundenen Unsicherheiten und blinden Flecken. Der integrative Ansatz zur Bewertung des Infrastrukturbedarfs und der wirtschaftlichen Auswirkungen wird Informationen über die Art der Infrastruktur und die Investitionskosten liefern, die für politische Entscheidungsträger von großer Bedeutung sind, aber auch eine große Lücke in der österreichischen und teilweise auch in der internationalen Modellierungsgemeinschaft schließen.
- Die Anwendung von angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodellen (CGE) wird durch i) die Einbeziehung zusätzlicher Investitionsanforderungen für bestimmte Infrastrukturen, ii) die Implementierung einer spezifischen Darstellung wichtiger Technologien zur Emissionsminderung (z. B. Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff), sowie iii) die Aufnahme von Elementen der Kreislaufwirtschaft (CE), die in der aktuellen Literatur auf die Ressourcengewinnung, einfaches Recycling und Reparaturaktivitäten beschränkt ist, vorangetrieben. In der Kreislaufwirtschaft beziehen wir Strategien, die die Struktur und Vernetzung der Kernindustrieweige verändern, mit ein (z. B. integrative Ressourcenrückgewinnung und kollaborative Industriesymbiosen).
- Durchführung einer ersten vollständig integrierten, sektorgekoppelten Bewertung von Klimaneutralitätsszenarien in einem Energiesystem mit hoher zeitlicher und mittlerer räumlicher Auflösung für Österreich, die eine konsistente Integration europaweiter Übertragungsnetze und Pipeline-Infrastruktur ermöglicht, die in den bestehenden österreichischen Szenarien derzeit fehlt. So können wir das österreichische Energiesystem auf einem hohen Detaillierungsgrad bewerten und gleichzeitig die Auswirkungen des Handels mit anderen europäischen Ländern berücksichtigen. Darüber hinaus werden wir die österreichische Darstellung von PyPSA-EUR mit der österreichischen Energiebilanz in Einklang bringen, um sie an die offiziellen Berichtsstandards anzupassen. Dieser Ansatz ist ein bedeutender Fortschritt, um PyPSA-EUR für politische Analysen und Empfehlungen nutzbar zu machen, z. B. um in der üblicherweise in der Politik verwendeten sektoralen Aggregation zu informieren.
- Entwicklung eines Modellkopplungsrahmens durch Integration von PyPSA-EUR und dem gesamtwirtschaftlichen angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodell (CGE), aufbauend auf bestehenden Standardisierungsbemühungen des Projekts netzero2040.at. Die Kopplung hilft zu verstehen, wie sich die Wahl nachfrageseitiger Maßnahmen in Energiesystemmodellen, bei denen sie streng kostensenkende Auswirkungen haben, auf die gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten und Faktormärkte sowie auf die entsprechenden Indikatoren auswirkt. INFRA-ENSURE setzt sich für einen offenen Zugang zum Quellcode der verwendeten Modelle, zur Modellschnittstelle und zur Verarbeitung der Ergebnisse ein.

## Abstract

Motivation and intended results. Recently published pathways on Austrian climate neutrality highly agree on short term requirements: significant expansion of renewables, conversion to electric drives, switching to renewable based heating systems (esp. heat pumps), and to renewable production technologies in industry. For the longer term – beyond 2030 –, however, these studies diverge – implying crucial uncertainties – and leave blind spots. INFRA-ENSURE will fill these gaps, identify no-regret actions and derive policy implications. In particular, the lengthy planning and construction timelines for infrastructure necessitate early decision-making to ensure its timely availability and alignment with climate neutrality goals. INFRA-ENSURE will distill the shared infrastructure demands across different pathways and thus deliver a robust decision basis and explore the relative advantages, plausible scales and order of investment requirements of major alternatives. Uncertainties concern five interrelated dimensions. First, existing net-zero studies diverge in the long-term energy demand and the potential for reductions in hard-to-abate industries. In turn, studies that do derive detailed future energy demand in industry lack integration into broader energy system assessments, and neglect overall domestic and foreign (import) resource limitations, as well as interactions with other sectors. Second, modelling approaches used in scenario development

for Austria do not cover grids sufficiently; i.e. they are either not considering electricity, carbon, hydrogen and gas grids in the energy supply system, or do not use integrated approaches to model investment decisions (ÖNIP). These constraints, however, are highly important and can cause substantial changes in optimal energy system configurations. Third, the expansion potentials at the necessary speed for renewable electricity and for each generation technology diverge. While most existing models project higher wind power expansion, observed development shows a sluggish expansion of wind power and an accelerated deployment of solar PV in recent years, requiring adjustments in supposed maximum feasible technology expansion rates, in infrastructure demands and implied limitations. Fourth, the potentials for material demand reduction in a circular economy and respective energy demand implications are inadequately addressed, often only in a broad context without concrete specifications or quantifications. Most scenarios opt for economic and material growth without taking into account shifts in consumption patterns and levels. Fifth, the investment costs associated with the transition are a major research gap, as most available scenarios do not give detailed accounts of these costs. Improving our understanding of post 2030 pathways and respective infrastructure needs therefore requires a systematic and comprehensive assessment of all involved energy consumption sectors, which in turn requires advancing state-of-the-art energy system models in combination with tools that are able to capture economy-wide effects. This is the assessment that INFRA-ENSURE will carry out.

The systematic and integrative assessment of INFRA-ENSURE is a core requisite for robust analysis and reliable policy recommendations in this context.

Goal. The overall goal of INFRA-ENSURE is to derive quantifications and policy-related conclusions that can significantly strengthen and enhance key policies, in particular concerning decisions of infrastructure development. The means to reach this goal are:

- To establish a methodologically robust framework for analyzing national defossilization scenarios in a transparent and reproducible way by integrating and advancing state-of-the-art models of the energy sector and of overall economic interaction.
- To assess the feasibility, consistency and economy-wide effects of the range of pre-existing sector-specific as well as cross-sectorial net-zero emission pathways at high temporal and medium spatial resolution for Austria and thus reducing uncertainties in existing scenarios.
- To provide robust, transparent and well-founded propositions for the Austrian infrastructure development with detailed insights into infrastructure needs, more accurate estimates of investment requirements, including their no-regret segments, and a better understanding of the macroeconomic impacts of both supply-side interventions and demand-side policies and structural changes on economic growth, value added, emissions, and trade relations.
- To strengthen cross-sectoral understanding and easing collaboration across the carbon-neutrality stakeholder and policy-maker landscape in Austria.

Approach: Structured iteratively, the project follows a robust, model-based and co-designed assessment approach for cross-sectoral defossilization scenarios and respective policy demands for Austria post-2030. WP1 recurrently provides a focal point for a continuous project evaluation with stakeholders and scientific experts, alongside traditional project management. WP2 generates a set of consistent, cross-sectoral defossilization pathways for Austria that go beyond current approaches and decidedly reduces the large uncertainty space beyond 2030. These scenarios will be evaluated within a modelling framework in WP3, that links a detailed energy system model (from WP4) with a macroeconomic CGE model (from WP5). Based on model results, in WP6 we will derive policy recommendations including no-regret infrastructure investment paths and communicate the results and conclusions to the public and the scientific community.

We base our pathways on the span of input parameters from existing scenarios and complement them to overcome their

blind spots. Our integrated model framework links a Europe-wide, sector-coupled energy system model (PyPSA-EUR) to a macroeconomic computable general equilibrium (CGE) model of Austria (WEGDYN-AT). PyPSA-EUR provides a sufficiently high resolution in the crucial fundamentals with its high temporal resolution, and medium spatial resolution, to be able to assess required grid and pipeline infrastructure. Also, it covers all energy demand sectors. Currently, this model represents Austria using generic European data and model outputs do not align with official reporting standards. Therefore, we increase the resolution of Austrian energy system representation, and integrate it consistently in the European wide transmission grid and pipeline infrastructure. Existing Austrian scenarios lack this feature. Crucially, coupling the energy model with the CGE model enables us to study how changes in the energy system and economic sectors (e.g. steel, chemical industry, transport, cement) impact overall economic indicators, distribution and welfare.

Degree of innovation. We go beyond the state-of-the-art in modeling defossilization pathways for Austria in four ways, and in each of them the methodological approach also pushes the international research frontier:

- Focus on the post 2030 period and the associated uncertainties and blind spots. The integrative approach to assess infrastructure demands and economic implications will allow for type of infrastructure and cost of investment information, highly relevant for policy makers, but also a major gap in the Austrian and partly the international modeling community.
- Advancing the application of computable general equilibrium (CGE) models by i) the inclusion of additional investment requirements for specific infrastructures, an issue which is usually not accounted for or only treated roughly, ii) implementing a specific representation of key mitigation technologies, such as hydrogen generation and distribution or innovative forms of home-heating, as well as iii) the uptake of circular economy (CE) elements, which is limited in the current literature to resource extraction, simple recycling, and repair activities. Concerning CE we go beyond current approaches and focus on strategies that change the structure and interconnectedness of core industrial sectors (for example integrative resource recovery and recycling, collaborative industrial symbioses and other cross-sector collaboration practices such as CCU). In general, modelling the net-zero transition in such detail and scope is unprecedented in the CGE modelling literature. In INFRA-ENSURE we will thus push the international research frontier regarding these questions in the domain of CGE modeling.
- Conducting a first fully integrated sector-coupled assessment of climate neutrality scenarios in an energy system with high temporal and medium spatial resolution for Austria, allowing for the consistent integration of European-wide transmission grids and pipeline infrastructure, currently lacking in existing Austrian scenarios. Thus, we can assess the Austrian energy system at a high level of detail while still accounting for trade effects with other European countries. Furthermore, we will make the Austrian representation of PyPSA-EUR consistent with the Austrian Energy Balance to match it with official reporting standards. This approach goes well beyond existing PyPSA-EUR applications and is a significant advance in making PyPSA-EUR useful for policy analysis and recommendations, e.g. to inform on required infrastructures and their respective implications in a sectoral aggregation usually used in policy making.
- Development of a model coupling framework by integrating PyPSA-EUR and the economy-wide computable general equilibrium (CGE) model, building on existing standardization efforts from the netzero2040.at project. The coupling helps to understand how the choice of demand-side measures in energy system models, where they have strictly cost decreasing effects, impact economy wide value chains and factor markets, and respective indicators. INFRA-ENSURE is committed to open access to the source code of the models used, the model interface and the processing of the results.

The resulting net-zero pathways will inform in much more detail about infrastructure needs than currently available assessments and provide investment costs at a much higher level of detail, leading to more robust overall economic cost estimates and transparency. Additionally, crucial demand side measures, which range from new perspectives on the potential of the “circular economy” to the reduction of final service demand in key sectors (e.g. transport volume, output of

production sectors, heating and cooling degree days) will be assessed from a macro-economic point of view, increasing our understanding what this implies for economic growth, the distribution of value added between sectors as well as different household groups, total emissions and trade flows.

INFRA-ENSURE will also foster a deeper understanding of the factors that drive the underlying uncertainty after 2030. In particular the blind spots in current Austrian literature that will be tackled include (i) projections of future industrial energy demand and the potential for significant demand reductions through transitioning to a circular economy, (ii) estimates of the potential for domestic energy supply, and (iii) the depth of integration into EU and international energy networks.

### **Projektkoordinator**

- Universität Graz

### **Projektpartner**

- Universität für Bodenkultur Wien
- AIT Austrian Institute of Technology GmbH