


# Co-designing policy mixes and energy systems for decarbonisation: Expanding the role of energy system models

**Doctoral Thesis****Author(s):**

[Aliana, Arnau](#) 

**Publication date:**

2025

**Permanent link:**

<https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-c-000789229>

**Funding acknowledgement:**

- Co-designing optimal policy mixes and energy systems for decarbonization ()
- RESPONSE - to society and policy needs through plant, food and energy sciences ()

DISS. ETH NO. 31474

CO-DESIGNING POLICY MIXES AND ENERGY SYSTEMS FOR  
DECARBONISATION: EXPANDING THE ROLE OF ENERGY  
SYSTEM MODELS

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ARNAU ALIANA GUARDIA

born on 17.06.1997

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. V. H. Hoffmann, examiner  
Prof. Dr. E. Trutnevyte, co-examiner

2025

## ABSTRACT

---

Climate change represents one of the greatest challenges of our time, driven primarily by CO<sub>2</sub> emissions from global energy production and use. Our continued reliance on fossil fuels locks in carbon-intensive infrastructures and practices, making transformation difficult despite the availability of mature low-carbon technologies across sectors. Policies are key to overcoming this lock-in, as they can address structural, economic, and institutional barriers, guide investments, and accelerate the deployment of more sustainable alternatives.

However, designing effective policies remains a complex task. Single instruments are rarely sufficient, so governments rely on policy mixes that can complement each other and enhance overall effectiveness. These mixes must be designed with careful consideration of how instruments interact with each other and with the evolving energy system. Most research on designing policy mixes relies on qualitative ex-post studies, which are valuable for contextual insights but less suited to systematically testing many options or charting the co-evolution of policies and energy systems. This calls for quantitative approaches able to explore alternatives and assess interactions over time, such as energy system models (ESMs).

Bottom-up ESMs, with their detailed techno-economic representation, are theoretically well-suited to inform ex-ante policy design and assess system-wide impacts. Yet their application to this task remains limited: most studies rely on scenario-based approaches that treat policies as fixed inputs, offering little support for exploring alternative mixes or assessing instrument interactions. Addressing this gap requires methods that integrate policy and system design within a single framework, enabling the analysis of their co-evolution with a long-term perspective. This thesis takes up this challenge by asking: *How can energy system models be used to support the ex-ante co-design of policy mixes and energy systems for cost-efficient decarbonisation?*

To address this question, the thesis comprises four studies. Study I reviews a representative sample of recent studies using bottom-up ESMs for diverse policy-relevant analyses, examining how they represent policy instruments, construct scenarios, choose performance indicators, and address sector coupling. It identifies dominant practices such as the focus on CO<sub>2</sub> pricing and the reliance on scenario analysis, and highlights underexplored aspects including policy interactions and cost distribution, underscoring the need for more integrated approaches. Study II presents the thesis' core methodological contribution: MANGOpol, a bi-level optimisation framework for the co-design of energy systems and policy mixes for decarbonisation. This simultaneous optimisation of technology investments and operations, and the selection and sequencing of a broad range of policy instruments ensures that policy and system design are developed together, reflecting their interdependent nature. Studies III and IV apply this framework to co-design policy mixes and energy systems in two real-world cases of high relevance for decarbonisation: the Swiss residential building sector and the German electricity system. In the building sector case, MANGOpol compares uniform and tailored policy mixes for a heterogeneous building stock, assessing how differences in building type and age affect technology adoption and the choice of policy instruments. In the case of the German electricity system, MANGOpol is extended to identify both

optimal and near-optimal solutions in order to reveal multiple cost-efficient decarbonisation pathways with varying technology choices, policy designs, and cost distributions.

Overall, the contributions and findings of this thesis demonstrate that integrating policy and system design is essential for effective decarbonisation. For policymakers, they show that coordinated policy mixes combining complementary instruments can deliver deeper decarbonisation at lower cost than single-instrument strategies. They also highlight that early and well-sequenced interventions reduce overall costs, that tailoring policy design to sectoral heterogeneity can enable a more strategic use of instruments, and that different combinations of policies and technologies can achieve comparable performance. For modellers, the thesis demonstrates how embedding policy design into bottom-up ESMs enables systematic exploration of alternative policy mixes, assessment of their interactions with system change, and identification of robust solutions beyond predefined scenarios. In doing so, it expands the role of bottom-up ESMs from passive assessment tools to active decision-support framework for the co-design of cost-efficient decarbonisation pathways that can directly inform policymaking.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Der Klimawandel ist eine der grössten Herausforderungen unserer Zeit, und wird in erster Linie durch CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der weltweiten Energieerzeugung und -nutzung verursacht. Unsere fortwährende Abhängigkeit von fossilen Energieträgern führt zu einem Lock-In kohlenstoffintensiver Infrastrukturen und Praktiken, sodass eine Transformation erschwert wird, obwohl in allen Sektoren bereits ausgereifte kohlenstoffarme Technologien zur Verfügung stehen. Politische Massnahmen sind der Schlüssel zur Überwindung dieser Lock-Ins, da sie strukturelle, wirtschaftliche und institutionelle Hindernisse beseitigen, Investitionen lenken und die Einführung nachhaltigerer Alternativen beschleunigen können.

Die Gestaltung wirksamer politischer Massnahmen stellt jedoch nach wie vor eine komplexe Aufgabe dar. Einzelne Instrumente reichen selten aus, sodass Regierungen auf Massnahmenpakete zurückgreifen, deren Komponenten sich gegenseitig ergänzen und die Gesamtwirksamkeit steigern können. Bei der Gestaltung dieser Massnahmenpakete muss sorgfältig berücksichtigt werden, wie die Instrumente untereinander und mit einem sich wandelnden Energiesystem interagieren. Der Grossteil der Forschung zur Ausgestaltung von Massnahmenpaketen stützen sich auf qualitative Ex-post-Studien, die zwar wertvolle Einblicke liefern, sich jedoch weniger dafür eignen, verschiedene Optionen systematisch zu testen oder die gemeinsame Entwicklung von Politik und Energiesystemen zu erfassen. Dies erfordert quantitative Ansätze, mit denen Alternativen untersucht und Wechselwirkungen im Zeitverlauf bewertet werden können, wie beispielsweise Energiesystemmodelle (ESM).

Bottom-up-ESM eignen sich aufgrund ihrer detaillierten techno-ökonomischen Darstellung theoretisch gut, um die Ex-ante-Gestaltung von Massnahmen zu unterstützen und systemweite Auswirkungen zu bewerten. Ihr Anwendungsbereich für diese Aufgabe ist jedoch nach wie vor begrenzt: Die meisten Studien nutzen szenariobasierte Ansätze, die politische Massnahmen als exogene Inputs behandeln und wenig Unterstützung dafür bieten, alternative Kombinationen zu untersuchen oder Interaktionen zwischen Instrumenten zu bewerten. Um diese Lücke zu schliessen, werden Methoden benötigt, die Politik- und Energiesystemgestaltung in ein einheitliches Framework integrieren und so die Analyse ihrer langfristigen, gemeinsamen Entwicklung ermöglichen. Diese Arbeit widmet sich dieser Herausforderung an und fragt: *Wie können Energiesystemmodelle genutzt werden, um die gemeinsame Ex-ante-Ausgestaltung von politischen Massnahmenpaketen und Energiesystemen für eine kosteneffiziente Dekarbonisierung zu unterstützen?*

Um diese Frage zu beantworten, umfasst diese Arbeit vier Studien. Studie I untersucht eine repräsentative Auswahl aktueller Studien, die Bottom-up-ESM- für unterschiedliche politisch relevante Analysen verwenden und analysiert, wie diese politische Instrumente dargestellt, Szenarien konstruieren, Leistungsindikatoren wählen und Sektorkopplungen berücksichtigen. Wir identifizieren vorherrschende Praktiken wie die Fokussierung auf CO<sub>2</sub>-Bepreisung und die Abhängigkeit von Szenarioanalysen und heben wenig erforschte Aspekte wie politische Interaktionen und Kostenverteilung hervor, wodurch die Notwendigkeit integrierter Ansätze unterstrichen wird. Studie II präsentiert den zentralen methodischen Beitrag dieser Arbeit: MANGOPol, ein zweistufiger Optimierungsframework für die gemeinsame Gestaltung von Energiesystemen und politischen Massnahmenpaketen zur Dekarbonisierung. Diese gleichzeitige Optimierung von Technologieinvestitionen und

Betriebsabläufen sowie der Auswahl und Abfolge einer breiten Palette von politischen Instrumenten stellt sicher, dass Politik- und Systemgestaltung gemeinsam erfolgen und so ihre gegenseitige Abhängigkeit widerspiegelt wird. Die Studien III und IV wenden dieses Framework an, um politische Massnahmenpakete und Energiesysteme in zwei realen, für die Dekarbonisierung besonders relevanten Fällen gemeinsam zu entwerfen: dem Schweizer Wohngebäudesektor und dem deutschen Stromsystem. Im Gebäudesektor vergleicht MANGOpol standardisierte und massgeschneiderte Massnahmenpakete in einem heterogenen Gebäudebestand und bewertet, wie sich Unterschiede in Gebäudetyp und -alter auf die Einführung von Technologien und die Wahl der politischen Instrumente auswirken. Im Fall des deutschen Stromsystems wird MANGOpol erweitert, um sowohl optimale als auch nahezu optimale Lösungen zu identifizieren und so mehrere kosteneffiziente Dekarbonisierungspfade mit unterschiedlichen Technologieentscheidungen, Politikgestaltungen und Kostenverteilungen aufzuzeigen.

Insgesamt zeigen die Beiträge und Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Integration von Politik- und Systemgestaltung für eine wirksame Dekarbonisierung unerlässlich ist. Für politische Entscheidungsträger zeigen sie, dass koordinierte Massnahmenpakete, die komplementäre Instrumente kombinieren, eine tiefgreifendere Dekarbonisierung zu geringeren Kosten ermöglichen als Strategien mit nur einem Instrument. Sie verdeutlichen auch, dass frühzeitige und gut aufeinander abgestimmte Interventionen die Gesamtkosten senken, dass eine auf die sektorale Heterogenität zugeschnittene Politikgestaltung den strategischeren Einsatz von Instrumenten ermöglicht und dass unterschiedliche Kombinationen von Politikmassnahmen und Technologien zu ähnlichen Ergebnissen führen können. Für Modellierer zeigt die Arbeit, wie die Einbettung der Politikgestaltung in Bottom-up-ESMs eine systematische Untersuchung alternativer politischer Massnahmenpakete, die Bewertung ihrer Wechselwirkungen mit Systemveränderungen und die Identifizierung robuster Lösungen über vordefinierte Szenarien hinaus ermöglicht. Damit erweitert sie die Rolle von Bottom-up-ESMs von passiven Bewertungsinstrumenten zu einer aktiven Entscheidungshilfe für die gemeinsame Gestaltung kosteneffizienter Dekarbonisierungspfade, die direkt in die Politikgestaltung einfließen können.