ETH zürich

ETH Library

Policies for cost-effective decarbonization of residential buildings and transport: Addressing sector coupling and diverse actor perspectives

Doctoral Thesis

Author(s):
Lerbinger, Alicia

Publication date:
2025

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-c-000785580

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 31379

POLICIES FOR COST-EFFECTIVE DECARBONIZATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS AND TRANSPORT: ADDRESSING SECTOR COUPLING AND DIVERSE ACTOR PERSPECTIVES

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ALICIA LERBINGER

born on 08.11.1994

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. V. H. Hoffmann, examiner
Prof. Dr. F. Maréchal, co-examiner

2025

ABSTRACT

Climate change is one of the most urgent challenges of our time, requiring rapid decarbonization across all sectors to limit global temperature increases. The buildings and transport sectors together account for a substantial share of global final energy use and energy-related CO_2 emissions. This makes their decarbonization critical for achieving climate targets. However, current emission reductions fall short of the targets, which indicates that existing policy measures have been insufficient to drive the necessary structural changes quickly enough.

The decarbonization of residential energy systems, which includes both building energy use and associated mobility demands, is essential but faces several challenges. High upfront costs for building retrofits and electric vehicle adoption deter households and property owners despite potential long-term cost savings. Further, the electrification of both heating and transportation introduces new interdependencies between previously separate sectors, referred to as sector coupling. The transition is further complicated by the involvement of numerous actors, whose misaligned interests can hinder the implementation of decarbonization measures. Designing policies that do not consider these sectoral interdependencies and actor-specific perspectives results in slower emission reductions.

Techno-economic optimization models are valuable tools for exploring cost-effective decarbonization pathways, but current approaches have limitations when applied to residential energy systems. Most existing models focus on single sectors or make considerable simplifications when modeling multiple sectors. This limits their ability to identify cross-sectoral synergies. Further, they typically adopt a central planner perspective that does not account for the diverse actors involved in residential energy transitions, which can lead to solutions that are theoretically optimal but cannot be implemented.

This thesis addresses the central research question: *What policies enable the cost-effective decarbonization of residential buildings and transportation, considering sector coupling and different actor perspectives?* It develops comprehensive techno-economic optimization frameworks using multi-stage mixed-integer linear programming models and applies them to Swiss case studies, representative of the broader European context. It advances traditional techno-economic modeling along two primary dimensions: sector coupling through building-electric vehicle integration, and the consideration of different actor perspectives.

Four individual studies collectively address different aspects of the research question. Study I introduces MANGOever, a comprehensive framework for optimizing building energy systems, retrofits, and electric vehicle charging infrastructure over long time horizons. It incorporates EV driver behaviors based on real-world travel patterns rather than assuming perfect control over charging processes. Study II applies the MANGOever framework to assess different electricity pricing structures for residential customers. It analyzes how tariff designs impact both building and transportation electrification. Study III shifts the focus to institutional real estate portfolios. It introduces a portfolio-level optimization framework that accounts for heterogeneous building characteristics and different policy scenarios and enables the identification of cost-effective retrofitting strategies at the portfolio level. Study IV addresses the landlord-tenant dilemma by integrating different actor perspectives and

evaluating policy instruments designed to address the split incentives between building owners and tenants.

The thesis contributes to the growing body of literature on techno-economic optimization modeling for the residential energy transition. Methodologically, it extends existing modeling approaches by incorporating behaviorally realistic driver patterns from empirically grounded agent-based models to enable a more accurate assessment of available flexibility in electric vehicle charging demand. It proposes frameworks that account for actor heterogeneity and distributed decision-making. The portfolio approach in Study III offers a novel perspective that links individual building retrofit plans to real estate investment portfolios, while Study IV advances the modeling of distributional policy impacts by capturing the perspectives of both landlords and tenants.

Key empirical findings demonstrate the potential of sector coupling to improve system efficiency. Time-of-use electricity tariffs and increasing block grid charges effectively support heat pump adoption and EV home charging. For institutional investors, portfolio-level policy approaches are more advantageous than building-level requirements, as they reduce total decarbonization costs while achieving similar emission reductions. Addressing the landlord-tenant dilemma requires comprehensive policy mixes as individual measures prove insufficient to encourage both energy supply- and demand-side interventions. These findings offer valuable insights for policymakers who aim to accelerate residential energy system decarbonization. They highlight how coordinated policy design across sectors is essential to avoid conflicting signals that could discourage electrification. The frameworks developed in this thesis bridge the gap between theoretical decarbonization potential and real-world implementation and provide insights into more effective, socially acceptable, and economically viable policy instruments.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Klimawandel stellt eine der drängendsten Herausforderungen unserer Zeit dar und macht eine rasche Dekarbonisierung aller Wirtschaftssektoren erforderlich, um die globale Erderwärmung zu begrenzen. Die Gebäude- und Verkehrssektoren sind zusammen für einen Grossteil des weltweiten Endenergieverbrauchs und der energiebedingten CO_2- Emissionen verantwortlich. Daher ist ihre Dekarbonisierung entscheidend für das Erreichen der Klimaziele. Die derzeitigen Emissionseinsparungen bleiben jedoch hinter den Klimazielen zurück. Dies deutet darauf hin, dass die bisherigen politischen Maßnahmen nicht ausreichen, um die notwendigen strukturellen Veränderungen schnell genug voranzutreiben.

Die Dekarbonisierung der Energiesysteme von Haushalten, die sowohl den Gebäudeenergie- als auch den zugehörigen Mobilitätsbedarf umfassen, ist von entscheidender Bedeutung, steht jedoch vor mehreren Herausforderungen. Hohe Investitionskosten für Gebäudesanierungen und Elektrofahrzeuge schrecken Haushalte und Immobilienbesitzer trotz potenzieller langfristiger Kosteneinsparungen ab. Zudem entstehen durch die Elektrifizierung von Heizungssystemen sowie persönlicher Mobilität neue Abhängigkeiten zwischen den bisher getrennten Sektoren, die sogenannte Sektorkopplung. Erschwerend kommt hinzu, dass viele verschiedene Akteure beteiligt sind, deren unterschiedliche Interessen die Umsetzung von Dekarbonisierungsmassnahmen behindern können. Eine Politik, die diese sektorübergreifenden Zusammenhänge und akteursspezifischen Perspektiven nicht berücksichtigt, führt zu langsameren Emissionseinsparungen.

Aktuelle techno-ökonomische Optimierungsmodelle sind wertvolle Instrumente zur Erkundung kosteneffizienter Dekarbonisierungspfade, kommen jedoch bei der Anwendung auf Energiesysteme von Haushalten an ihre Grenzen. Die meisten bestehenden Modelle betrachten nur einzelne Sektoren oder nehmen erhebliche Vereinfachungen vor, wenn sie mehrere Sektoren modellieren, wodurch sektorübergreifende Synergien übersehen werden können. Außerdem gehen sie meist von einer zentralen Planungsinstanz aus und berücksichtigen nicht die Vielfalt der beteiligten Akteure. Dies kann zu theoretisch optimalen Lösungen führen, die in der Praxis jedoch nicht umsetzbar sind.

Diese Dissertation befasst sich mit der zentralen Forschungsfrage: *Welche politischen Massnahmen ermöglichen eine kosteneffiziente Dekarbonisierung von Wohngebäuden und Verkehr unter Berücksichtigung von Sektorkopplung und verschiedener Akteursperspektiven?* Dazu werden umfassende techno-ökonomische mehrstufige gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle entwickelt und auf Schweizer Fallstudien angewendet, die repräsentativ für den europäischen Kontext sind. Die Arbeit erweitert die traditionelle techno-ökonomische Modellierung in zwei wesentlichen Bereichen: der Sektorkopplung durch die gemeinsame Betrachtung von Gebäuden und Elektrofahrzeugen sowie der Berücksichtigung verschiedener Akteursperspektiven.

Vier einzelne Artikel behandeln verschiedene Aspekte der Forschungsfrage: Artikel I stellt MANGOever vor, ein umfassender Ansatz für die Optimierung von Gebäudeenergiesystemen, Sanierungsstrategien und Ladeinfrastruktur für Elektroautos über lange Zeiträume. Es berücksichtigt reales Mobilitätsverhalten basierend auf empirischen Daten, anstatt eine perfekte Kontrolle über Ladevorgänge anzunehmen. Artikel II wendet das MANGOever Modell an, um verschiedene Strompreistarife für Privatkunden zu untersuchen und zu analysieren,

wie sich die Tarifgestaltung auf die Elektrifizierung von Gebäuden und Verkehr auswirkt. Artikel III richtet den Fokus auf institutionelle Immobilienportfolios und entwickelt ein Optimierungsmodell für die Portfolioebene, das die unterschiedlichen Gebäudeeigenschaften und verschiedene politische Szenarien berücksichtigt und so kosteneffiziente Sanierungsstrategien identifiziert. Artikel IV behandelt das Vermieter-/Mieter-Dilemma. Er integriert verschiedene Akteursperspektiven und bewertet politische Instrumente, die die unterschiedlichen Anreize zwischen Gebäudeeigentümern und Mietern zu berücksichtigen.

Die Dissertation leistet einen Beitrag zur Weiterentwicklung der techno-ökonomischen Modellierung im Kontext der Dekarbonisierung der Haushalts-Energiesysteme. Methodisch erweitert sie bestehende Ansätze, indem sie realistische Mobilitätsverhaltensmuster aus empirisch fundierten agentenbasierten Modellen einbezieht. Dies ermöglicht es das Flexibilitätspotenzial beim Laden von Elektrofahrzeugen realistischer abzubilden. Sie schlägt neue Ansätze vor, um die Akteursvielfalt und dezentrale Entscheidungsfindung besser abzubilden. Der Portfolioansatz in Artikel III bietet eine neuartige Perspektive, um individuelle Gebäudesanierungspläne mit strategischer Investitionsplanung von Gebäudeportfolios zu verknüpfen. Artikel IV treibt die Modellierung von Verteilungseffekten politischer Massnahmen voran, indem er sowohl die Perspektive von Vermietern:innen als auch von Mieter:innen berücksichtigt.

Die empirischen Ergebnisse zeigen das Potenzial von Sektorkopplung zur Verbesserung der Systemeffizienz auf. Stromtarife mit zeitabhängigen Preisen und leistungsabhängige Netzentgelte fördern die Einführung von Wärmepumpen und das Laden von Elektroautos zu Hause. Für institutionelle Investoren ist die Implementierung von politischen Massnahmen auf Portfolioebene kosteneffizienter als gebäudeindividuelle Anforderungen, da sie die Gesamtkosten der Dekarbonisierung reduzieren und ähnliche Emissionseinsparungen erreichen. Das Vermieter-/Mieter-Dilemma erfordert umfassende Massnahmenpakete, da Einzelmassnahmen nicht ausreichen, um Investitionen in aktive und passive Massnahmen zu fördern. Diese Erkenntnisse bieten wertvolle Impulse für die Politikgestaltung zur Beschleunigung der Dekarbonisierung von Haushalten. Sie verdeutlichen, wie wichtig eine koordinierte Ausgestaltung sektorübergreifender Massnahmen ist, um widersprüchliche Anreize zu vermeiden, die die Elektrifizierung behindern könnten. Die in dieser Arbeit entwickelten Modelle helfen die Lücke zwischen dem theoretischen Dekarbonisierungspotenzial und der praktischen Umsetzung zu schliessen und liefern Ansatzpunkte für wirksame, sozialverträgliche und wirtschaftlich tragfähige politische Strategien.