

DISS. ETH Nr. 29615

# **Modeling the Low-Carbon Road Transport Transition**

## **Policy Insights and Implications**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZÜRICH

(Dr. Sc. ETH Zürich)

presented by

Bessie Maya Noll

MSc Mechanical Engineering, Stanford University

born on 17.09.1995

citizen of the United States of America

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Tobias S. Schmidt, examiner

Prof. Dr. Andreas Schäfer, co-examiner

Prof. Dr. Sonia Yeh, co-examiner

Zürich, 2023

# *Abstract*

Climate change represents one of humanity's most pressing challenges to date, the effects of which are no longer merely speculative but tangibly destructive. The increase of greenhouse gas (GHG) emissions due to human activities has gradually warmed the planet, triggering alarming environmental and societal concerns. To prevent the most severe impacts of climate change, rapid and deep decarbonization of the energy sector led by sweeping institutional, behavioral, but in particular technological change at the global level is required.

Road transport, a sub-sector within, accounts for nearly 13% of global total greenhouse gas (GHG) emissions as the majority of the sector runs on fossil fuel-powered vehicles. Transitioning this sector to low-carbon alternatives is thus necessary and now possible given the emergence of cost-competitive sustainable technologies such as electric vehicles (EVs). However, the shift to EVs still faces several important barriers in both the passenger and commercial vehicle sectors. To overcome these barriers and facilitate a smooth transition, the involvement of government is crucial, primarily to increase the diffusion of "clean" but immature technologies into the market.

Accordingly, this thesis aims to enhance our comprehension of how public policy can accelerate transformative change in the road transport sector towards low-carbon technologies. In particular, the thesis argues that policymakers need up-to-date, quantitative, approaches to evaluate and project dynamic technology competition and to assess prospective policy impacts on the transition. Four papers, each with developed methodological tools, are presented to address this assertion. The overarching research framework sub-divides the road transport sector into two distinct segments, passenger and commercial, to highlight their individual transitional characteristics and suggest relevant policy measures therein.

Contributing to the extant literature, Paper 1 compares for the first time the levelized cost of charging electric vehicles (LCOC) across many charging options and countries in Europe. Paper 3 devises a methodological framework for comparative cost analysis, on a total cost of ownership (TCO) basis, of commercial vehicle drive-technologies in specific applications and countries in Europe. Building on these tools, Paper 4 incorporates both the TCO and LCOC logic in a newly developed system-dynamics model to project future market shares of competing commercial vehicle technologies in different applications and global regions. This model constitutes the main contribution of the presented work. Importantly, individual Paper 4 theorizes a framework for understanding the effects of local (national) policy interventions on global technological change through spillovers. Lastly, Paper 2 employs a simplified version of the model developed in Paper 4 to assess transitional impacts of taxing battery-electric vehicles in order to manage public revenue streams from declining fuel taxes in the passenger vehicle segment.

The thesis concludes with key insights for policymakers. In the passenger sector, the transition to low-carbon vehicles is largely underway. Thus, two ancillary concerns for policymakers to ensure a swift transition to electric cars are expanded upon: management of charging costs and balancing of public revenue streams without impeding the transition. In the commercial sector, the transition lags and thus requires increased policy support for low-carbon vehicle adoption.

Select policy instruments that target vehicle operating as opposed to capital costs, such as road tolls, are essential to increase zero-emission vehicle competitiveness. Across both sectors, moderating factors for global innovation, such as innovation spillovers, are fundamental accelerators of global technological change and should be explored fully. Crucially, spillovers can expand the benefits of stringent national policy but they can also reduce the incentive for intervention. As such, it is particularly important for policymakers to understand the extent of these spillovers in devising actionable policy recourse.

Finally, for the transitions modeling community, this thesis offers improved representation of innovation dynamics in computational models. In particular, the model developed in Paper 4 uniquely includes and quantifies the effects of innovation spillovers while also endogenizing technological learning with the help of multi-component experience curves. These elements are further integrated into a forward-looking modeling framework to assess policy impact. Though applied to the road transport transition specifically, this framework applies equally to sustainability transitions more broadly where technologies compete and policy intervention is conceivable. In wrapping up, the limitations of this thesis are considered and potential avenues for future research explored.

# *Zusammenfassung*

Der Klimawandel ist eine der drängendsten Herausforderungen für die Menschheit, deren Auswirkungen nicht mehr nur spekulativ, sondern spürbar zerstörerisch sind. Der Anstieg der Treibhausgasemissionen aufgrund menschlicher Aktivitäten hat zu einer allmählichen Erwärmung des Planeten geführt und alarmierende ökologische und gesellschaftliche Probleme ausgelöst. Um die schwerwiegendsten Auswirkungen des Klimawandels zu verhindern, ist eine rasche und tiefgreifende Dekarbonisierung des Energiesektors erforderlich, die durch einen umfassenden institutionellen, verhaltensbezogenen, aber vor allem technologischen Wandel auf globaler Ebene eingeleitet werden muss.

Der Strassenverkehr, ein Teilbereich des Sektors, ist für fast 13% der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich, da der Grossteil der Fahrzeuge nach wie vor mit fossilen Brennstoffen betrieben wird. Da der Grossteil der Fahrzeuge nach wie vor mit fossilen Brennstoffen betrieben wird. Die Umstellung dieses Sektors auf kohlenstoffarme Alternativen ist daher notwendig und angesichts des Aufkommens wettbewerbsfähiger nachhaltiger Technologien wie Elektrofahrzeuge (EVs) nun auch möglich. Die Umstellung auf E-Fahrzeuge stösst jedoch sowohl im Personen- als auch im Nutzfahrzeugsektor noch auf einige wichtige Hindernisse. Um diese Hindernisse zu überwinden und einen reibungslosen Übergang zu ermöglichen, ist die Beteiligung der Regierung entscheidend, um die Verbreitung "sauberer", aber unausgereifter Technologien auf dem Markt zu fördern.

Dementsprechend zielt diese Arbeit darauf ab, unser Verständnis dafür zu verbessern, wie die öffentliche Politik den Wandel im Strassenverkehrssektor hin zu kohlenstoffarmen Technologien beschleunigen kann. Insbesondere wird in dieser Arbeit argumentiert, dass politische Entscheidungsträger aktuelle, quantitative Ansätze benötigen, um den dynamischen Technologiewettbewerb zu bewerten und zu projizieren und die voraussichtlichen Auswirkungen der Politik auf die Verkehrswende zu beurteilen. Es werden vier Beiträge mit jeweils entwickelten methodischen Instrumenten vorgestellt, die sich mit dieser Behauptung befassen. Der übergreifende Forschungsrahmen unterteilt den Strassenverkehrssektor in den Personenverkehr und den gewerblichen Verkehr, um deren individuelle Übergangsmerkmale hervorzuheben und entsprechende politische Massnahmen vorzuschlagen.

Als Beitrag zur bestehenden Literatur vergleicht Paper 1 zum ersten Mal die nivellierten Kosten für das Aufladen von Elektrofahrzeugen (LCOC) für viele Ladeoptionen und Länder in Europa. In Beitrag 3 wird ein methodischer Rahmen für eine vergleichende Kostenanalyse auf Basis der Gesamtbetriebskosten (TCO) von Nutzfahrzeug-Antriebstechnologien für bestimmte Anwendungen und Länder in Europa entwickelt. Darauf aufbauend werden in Beitrag 4 sowohl die TCO- als auch die LCOC-Logik in ein neu entwickeltes systemdynamisches Modell integriert, um zukünftige Marktanteile konkurrierender Nutzfahrzeugtechnologien in verschiedenen Anwendungen und globalen Regionen zu prognostizieren. Dieses Modell stellt den Hauptbeitrag der vorliegenden Arbeit dar. Als wichtiger Beitrag in Paper 4 ein Rahmen für das Verständnis der Auswirkungen lokaler (nationaler) politischer Interventionen auf den globalen technologischen

Wandel durch Spillover-Effekte theoretisiert. Schliesslich wird in Paper 2 eine vereinfachte Version des in Paper 4 entwickelten Modells verwendet, um die Auswirkungen der Besteuerung von batterieelektrischen Fahrzeugen auf den Übergang zu bewerten, um die öffentlichen Einnahmen aus sinkenden Kraftstoffsteuern im Pkw-Segment zu verwalten.

Die Arbeit schliesst mit wichtigen Erkenntnissen für politische Entscheidungsträger. Im Personenverkehr ist der Übergang zu kohlenstoffarmen Fahrzeugen bereits weitgehend vollzogen. Daher werden zwei periphere Anliegen der politischen Entscheidungsträger, die einen raschen Übergang zu Elektroautos sicherstellen sollen, vertieft: das Management der Ladekosten und der Ausgleich der öffentlichen Einnahmenströme. Im gewerblichen Sektor verzögert sich die Wende und erfordert daher eine starke politische Unterstützung für die Einführung kohlenstoffarmer Fahrzeuge. Ausgewählte politische Instrumente, die auf die Betriebs- und nicht auf die Kapitalkosten der Fahrzeuge abzielen, wie z. B. Strassenbenutzungsgebühren, sind von entscheidender Bedeutung, um die Wettbewerbsfähigkeit emissionsfreier Fahrzeuge zu erhöhen. In beiden Sektoren sind moderierende Faktoren für globale Innovationen, wie z. B. Innovations-Spillover, wesentliche Beschleuniger des globalen technologischen Wandels und sollten umfassend erforscht werden. Entscheidend ist, dass Spillover-Effekte die Vorteile einer strengen nationalen Politik verstärken, aber auch den Anreiz zum Eingreifen verringern können. Daher ist es für die politischen Entscheidungsträger besonders wichtig, das Ausmass des Spillovers zu verstehen, um geeignete politische Gegenmassnahmen zu entwickeln.

Schliesslich bietet diese Arbeit für die Modellierer der Energiewende eine verbesserte Darstellung der Innovationsdynamik in Computermodellen. Insbesondere das in Paper 4 entwickelte Modell beinhaltet und quantifiziert in einzigartiger Weise die Auswirkungen von Innovations-Spillovers und endogenisiert gleichzeitig technologisches Lernen mit Hilfe von Multikomponenten-Erfahrungskurven. Diese Elemente werden in einen zukunftsorientierten Modellierungsrahmen integriert, um die Auswirkungen der Politik zu bewerten. Obwohl dieser Rahmen speziell auf die Energiewende im Strassenverkehr angewandt wird, gilt er auch für Entwicklungen zu mehr Nachhaltigkeit im weiteren Sinne, wenn Technologien miteinander konkurrieren und politische Eingriffe denkbar sind. Die Arbeit schliesst mit einer Reflexion über die Grenzen der Arbeit und zeigt mögliche Richtungen für zukünftige Forschung auf.