

DISS. ETH NO. 29003

CROSS-SECTORAL INTEGRATION OF
LOW-CARBON TECHNOLOGIES: MOBILIZING
DEMAND-SIDE FLEXIBILITY FROM
ELECTRIFICATION

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CHRISTINE JOHANNA GSCHWENDTNER
Master of Science, University of Oxford, UK

born on 08 September 1995
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. V. H. Hoffmann, examiner
Prof. Dr. J. E. Trancik, co-examiner

2023

ABSTRACT

Electrification of technologies and services that run on fossil fuels is a key measure to address decarbonization and hence, climate change mitigation. Technologies for electrification, such as electric vehicles (EVs) and heat pumps (HPs), have been increasingly adopted in recent years and further acceleration of adoption is required for a timely energy transition. Electrification results in the coupling of the electricity sector with other sectors. This sector coupling could result in both challenges and benefits, depending on how the technology is integrated into the system.

The decarbonization benefits of electrification assume that electricity supply will be renewable. High shares of variable wind and solar power require substantial flexibility for balancing electricity supply and demand, which is one of the key challenges for the transition to a zero-carbon electricity system. One source of flexibility is demand-side flexibility, which can avoid cost- and emission-intensive infrastructure investments. Its potential is often overestimated due to the focus on technical aspects while neglecting behavioral aspects. Consequently, this dissertation investigates both components: technology use (behavioral aspects) and technology control (technical aspects).

This dissertation addresses the research question of *how low-carbon technologies can be integrated across sectors to achieve flexible electricity demand*. Particular emphasis lies on sector coupling with heterogeneous behavioral aspects of technology integration, long-term planning with different technology diffusion stages, and both spatial and temporal considerations. The research case of this dissertation is the flexible integration of residential EVs. Besides the increasing uptake of EVs and their high relevance for personal vehicle decarbonization, this case was chosen primarily for two reasons: first, the potential for strong synergies between the two sectors as EV batteries could provide flexibility services; and second, the high dependence on technology use, e.g., driving and charging behavior. Technology control relates to control strategies of EV charging load in this case.

To address these research gaps, this dissertation applies both qualitative and quantitative methods and data. To investigate the implementation challenges of bidirectional charging in pilot projects, semi-structured expert interviews have been conducted. The remaining research objectives are addressed by developing an agent-based model (ABM) due to the high importance of heterogeneous behavior and interactions between EVs and charging stations. The research objectives comprise demonstrating differences in EV charging load profiles and their flexibility potentials in different grid contexts with different flexibility needs; identifying the effect of heterogeneous EV user behavior on

EV charging load at various EV and charging station diffusion stages; revealing the spatial-temporal flexibility of controlled EV charging considering elements of EV charging behavior that cannot be fully automated; and detailing to what extent financial incentives can leverage the spatial-temporal flexibility potential considering diverse adaptations of charging behavior.

This dissertation derives five key findings. First, based on the case of bidirectional charging, implementing a broad variety of configurations of demand-side flexibility, including different technologies, stacking flexibility services, and diverse technology use can reduce risk resulting from variations in demand-side flexibility provision. Second, this dissertation presents differences in electricity demand and its flexibility with respect to trade-offs between different flexibility goals, such as renewable energy integration or peak demand reduction, and across different spatial structures, such as urban, suburban, and rural areas. Third, changes in technology use, such as plug-in behavior, can provide flexibility in space and time, which relies on the combined diffusion of the technology and infrastructure, such as charging stations. Fourth, different combinations of automatically and non-automatically controllable elements of technology integration, e.g., controlled charging strategies and plug-in behavior, respectively, can increase or decrease the flexibility potential. Fifth, while hesitant reactions to financial incentives limit the spatial-temporal flexibility provision, particularly regarding the goal of integrating renewable energy, adapting financial incentives to the flexibility goals of different locations can increase flexibility.

Consequently, policymakers should consider sector coupling in addition to developing sector-specific policies. Policymakers and grid operators should consider that different grid contexts might require incentivizing different technology use and technology control, depending on the flexibility goal in a specific grid context due to trade-offs between flexibility goals. Decision-makers should closely monitor technology diffusion and the changing effects of different technology use patterns on flexibility provision as diffusion progresses. Regarding the automatic integration of technology, decision-makers should consider that not all elements of technology integration are automatically controllable and adjusting incentives to specific flexibility goals at different locations might be required.

The main contributions to existing literature relate to the effect of technology use on the successful flexibility provision of low-carbon technologies, generalizing from the case of EV integration. It is crucial to account for the heterogeneity in technology use as different behaviors can result in varying flexibility potentials. Both the significance of the effect of technology use and whether it increases or decreases the flexibility potential depend on 1) the flexibility goal, 2) the technology diffusion, and 3) the diffusion of technology control, e.g., applied control strategies and associated infrastructure. Particularly, the spatial

distribution and concentration of similar patterns of these three aspects affect the role of technology use in mobilizing demand-side flexibility.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Elektrifizierung von Technologien und Dienstleistungen, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, ist eine Schlüsselmaßnahme zur Dekarbonisierung und damit zur Eindämmung des Klimawandels. Technologien für die Elektrifizierung, wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen, wurden in den letzten Jahren zunehmend eingeführt, und für eine rechtzeitige Energiewende ist eine weitere Beschleunigung der Einführung erforderlich. Die Elektrifizierung führt zu einer Kopplung des Stromsektors mit anderen Sektoren. Diese Sektorenkopplung kann sowohl Herausforderungen als auch Vorteile mit sich bringen, je nachdem, wie die Technologie in das System integriert wird.

Die Vorteile der Dekarbonisierung durch Elektrifizierung setzen voraus, dass die Stromversorgung aus erneuerbaren Energien erfolgt. Ein hoher Anteil an variabler Wind- und Solarenergie erfordert erhebliche Flexibilität für den Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage, was eine der größten Herausforderungen für den Übergang zu einem kohlenstofffreien Stromsystem darstellt. Eine Quelle für Flexibilität ist die nachfrageseitige Flexibilität, die kosten- und emissionsintensive Infrastrukturinvestitionen vermeiden kann. Ihr Potenzial wird häufig überschätzt, da der Schwerpunkt auf technischen Aspekten liegt und Verhaltensaspekte vernachlässigt werden. Daher werden in dieser Dissertation beide Komponenten untersucht: Technologienutzung (Verhaltensaspekte) und Technologiesteuerung (technische Aspekte).

Diese Dissertation befasst sich mit der Forschungsfrage, *wie kohlenstoffarme Technologien sektorübergreifend integriert werden können, um eine flexible Stromnachfrage zu erreichen*. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Sektorkopplung mit heterogenen Verhaltensaspekten der Technologieintegration, der langfristigen Planung mit unterschiedlichen Technologiediffusionsstufen und sowohl räumlichen als auch zeitlichen Betrachtungen. Der Forschungsfall dieser Dissertation ist die flexible Integration von Elektrofahrzeugen (EV) von Privatpersonen. Neben der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen und ihrer hohen Relevanz für die Dekarbonisierung des Individualverkehrs wurde dieser Forschungsfall vor allem aus zwei Gründen gewählt: erstens wegen des Potenzials für starke Synergien zwischen den beiden Sektoren, da Elektrofahrzeugbatterien Flexibilitätsdienstleistungen erbringen können, und zweitens wegen der hohen Abhängigkeit von der Technologienutzung, z. B. dem Fahr- und Ladeverhalten. Die Technologiesteuerung bezieht sich in diesem Fall auf Kontrollstrategien der EV-Ladung.

Um diese Forschungslücken zu schließen, werden in dieser Dissertation sowohl qualitative als auch quantitative Methoden und Daten verwendet. Um die Herausforderungen bei der Umsetzung des bidirektionalen Ladens in Pilot-

projekten zu untersuchen, wurden halbstrukturierte Experteninterviews durchgeführt. Die verbleibenden Forschungsziele werden durch die Entwicklung eines agentenbasierten Modells (ABM) adressiert, da heterogenes Verhalten und Interaktionen zwischen Elektrofahrzeugen und Ladestationen von großer Bedeutung sind. Die Forschungsziele umfassen das Aufzeigen von Unterschieden in EV-Ladeprofilen und deren Flexibilitätspotenzialen in verschiedenen Netzkontexten mit unterschiedlichen Flexibilitätsbedürfnissen; die Identifizierung der Auswirkungen heterogenen EV-Nutzerverhaltens auf die EV-Ladung in verschiedenen EV- und Ladestationsverbreitungsstadien; das Aufzeigen der räumlich-zeitlichen Flexibilität des kontrollierten EV-Ladens unter Berücksichtigung von Elementen des EV-Ladeverhaltens, die nicht vollständig automatisiert werden können; und das Aufzeigen, inwieweit finanzielle Anreize das räumlich-zeitliche Flexibilitätspotenzial unter Berücksichtigung verschiedener Anpassungen des Ladeverhaltens unterstützen können.

In dieser Dissertation werden fünf zentrale Erkenntnisse abgeleitet. Erstens: Am Beispiel des bidirektionalen Ladens zeigt sich, dass die Umsetzung einer Vielzahl von Konfigurationen der nachfrageseitigen Flexibilität, einschließlich verschiedener Technologien, die kombinierte Bereitstellung von verschiedenen Flexibilitätsdiensten und der unterschiedlichen Nutzung von Technologien, das Risiko verringern kann, das sich aus Schwankungen bei der Bereitstellung von Flexibilität auf der Nachfrageseite ergibt. Zweitens werden in dieser Dissertation Unterschiede in der Stromnachfrage und ihrer Flexibilität im Hinblick auf Kompromisse zwischen verschiedenen Flexibilitätszielen, wie der Integration erneuerbarer Energien oder der Verringerung der Spitzennachfrage, und zwischen verschiedenen räumlichen Strukturen, wie städtischen, vorstädtischen und ländlichen Gebieten, dargestellt. Drittens können Änderungen in der Technologienutzung, wie z. B. das Einsteckverhalten, für räumliche und zeitliche Flexibilität sorgen, die von der kombinierten Verbreitung der Technologie und der Infrastruktur, wie z. B. Ladestationen, abhängt. Viertens können verschiedene Kombinationen von automatisch und nicht automatisch steuerbaren Elementen der Technologieintegration, z. B. kontrollierte Ladestrategien und Einsteckverhalten, das Flexibilitätspotenzial erhöhen oder verringern. Fünftens: Während zögerliche Reaktionen auf finanzielle Anreize das räumlich-zeitliche Flexibilitätsangebot einschränken, insbesondere im Hinblick auf das Ziel der Integration erneuerbarer Energien, kann die Anpassung finanzieller Anreize an die Flexibilitätsziele verschiedener Standorte die Flexibilität erhöhen.

Folglich sollten die politischen Entscheidungsträger neben der Entwicklung sektorspezifischer Maßnahmen auch die Sektorkopplung berücksichtigen. Politische Entscheidungsträger und Netzbetreiber sollten berücksichtigen, dass unterschiedliche Netzkontexte je nach Flexibilitätsziel aufgrund von Kompromissen zwischen den Flexibilitätszielen unterschiedliche Anreize für die Technologienutzung und die Technologiesteuerung erfordern könnten. Die Entscheidungsträger sollten die Technologieverbreitung und die sich mit vor-

anschreitender Verbreitung verändernden Auswirkungen verschiedener Technologienutzungsmuster auf die Flexibilitätsbereitstellung genau beobachten. Hinsichtlich der automatischen Integration von Technologien sollten die Entscheidungsträger berücksichtigen, dass nicht alle Elemente der Technologieintegration automatisch steuerbar sind und eine Anpassung der Anreize an spezifische Flexibilitätsziele an verschiedenen Standorten erforderlich sein könnte.

Die wichtigsten Beiträge zur bestehenden Literatur beziehen sich auf die Auswirkungen der Technologienutzung auf die erfolgreiche Bereitstellung von Flexibilität durch kohlenstoffarme Technologien, verallgemeinert von dem Fall der Integration von Elektrofahrzeugen. Es ist entscheidend, die Heterogenität der Technologienutzung zu berücksichtigen, da unterschiedliche Verhaltensweisen zu unterschiedlichen Flexibilitätspotenzialen führen können. Sowohl die Bedeutung des Effekts der Technologienutzung als auch die Frage, ob sie das Flexibilitätspotenzial erhöht oder verringert, hängen von 1) dem Flexibilitätsziel, 2) der Technologieverbreitung und 3) der Verbreitung der Technologiesteuerung, z. B. der angewandten Kontrollstrategien und der zugehörigen Infrastruktur, ab. Insbesondere die räumliche Verteilung und Konzentration ähnlicher Muster dieser drei Aspekte beeinflussen die Rolle der Technologienutzung bei der Mobilisierung nachfrageseitiger Flexibilität.