

Diss. ETH No. 22180

**Multi-purpose technologies, lock-in and efficiency –
Policy implications from the case of stationary electricity storage**

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

presented by

BENEDIKT MATTHIAS BATTKE

M.Sc. Mngt. and Econ., London School of Economics and Political Science

born 23.09.1984,

citizen of Germany

Examiner: Prof. Dr. Volker Hoffmann

Co-Examiner: Prof. Dr. Anthony Patt

2014

Abstract

Pressure to reduce greenhouse gas emissions from and dependence on fossil energy sources, in combination with the necessity to meet rising energy demand, has induced governments around the world to foster the deployment of renewable energy technologies (RETs). Besides the positive effects on the environment and on renewable technology development, the deployment policies for these technologies have also had negative consequences. For example, these policies have led to high economic costs and have partially endangered technological diversity by inadvertently locking out technological options that were not commercially competitive at the time of policy introduction. Yet above all, the high shares of intermittent and non-deterministic RETs (e.g., wind and solar power generation), which resulted from these policies, may challenge power security and quality. Of the technical options to address the intermittency resulting from high shares of RETs, stationary electricity storage (SES) – with its ability to decouple energy generation and consumption over time – is one of the most promising alternatives. In fact, policy schemes aiming to support the diffusion of SES have recently been implemented across several countries.

The present dissertation aims to improve the understanding of how policy makers can support the diffusion of SES technologies by taking into account the characteristics of these technologies. In contrast to most RETs, SES technologies can create value in very different ways and for different stakeholders in the energy system, making them technologies that can serve multiple, distinct applications (i.e., multi-purpose technologies). This multi-purpose character is highly relevant for policy makers since it adds an additional dimension (i.e., the applications of a technology) to the question of how to support these kinds of technologies. While this dimension offers policy makers additional degrees of freedom, the implications for the optimal design and implementation of deployment policies for multi-purpose technologies are unclear from both a practical and theoretical point of view. To address this gap, while incorporating the experience with deployment policies for RETs, the present dissertation employs the example of SES in order to investigate the following research question: *How can policy makers support the deployment of multi-purpose technologies while limiting the costs of support policies and maintaining technological diversity?*

In order to examine this research question, this dissertation builds upon and combines insights from the literature on innovation and evolutionary theory as well as from energy economics. To this end, it employs techno-economic simulation tools and regression analyses of patent data. Four papers are included in this dissertation, two of which focus on the costs of deployment policies and two focus on deployment policies and technological diversity. Specifically, the first paper investigates the life-cycle costs of several SES technologies - which impact the costs of deployment policies – across energy system applications, highlighting the high costs of SES in general as well as the strong variation in costs across applications. The second paper builds upon this finding on the technology level by

incorporating the value of the applications served in the energy market. Based on the resulting profitability assessment, and taking into account the multi-purpose character of SES, this paper develops a strategy for policy makers to implement efficient deployment policies. With respect to the link between deployment policies and technological diversity, the third paper analyzes the determinants of knowledge diffusion within and across SES technologies (i.e., the determinants of the direction of knowledge flows). A main result of this paper is the limited amount of inter-technology spillovers in general, and more specifically, the limited amount of inter-technology spillovers between specialized knowledge on core parts of a technology which increases the risk of a lock-in through deployment policies. In response to this finding, the fourth paper investigates the degree of competition among SES technologies holistically in order to derive implications for a deployment policy for multi-purpose technologies that minimizes the risk of a technological lock-in.

Several implications relevant to policy makers result from these findings. This dissertation shows that, in the case of multi-purpose technologies, policy makers can reduce the costs of deployment policies by sequentially supporting applications based on their profitability. Moreover, policy makers can avoid a premature lock-in into one technology by supporting applications with a high degree of competition among technologies or by adapting the specificity of deployment policies with respect to their targeted applications and technologies. Furthermore, policy support schemes that are likely to generate specialized and core knowledge can accelerate the development of existing technologies along established trajectories. Contrariwise, fostering activities that are likely to generate diversified and peripheral knowledge has the potential to increase technological diversity due to more inter-technology knowledge spillovers.

This dissertation contributes to the extant literature in multiple ways. Theoretical contributions result from the definition and discussion of the concept of multi-purpose technologies as well as from the introduction of the application perspective in the lock-in literature. A further theoretical contribution lies in the, to the author's knowledge, first study on the determinants of direction of technological knowledge flows, which is able to resolve inconclusive evidence of prior research and bridges the hitherto distinct literature streams of knowledge diffusion and product architecture. Methodological contributions include a heuristic to value SES technologies in the market, an indicator to assess the risk of lock-in through deployment policies, and the operationalization of the centrality of knowledge through the product architecture. Empirical contributions mainly comprise data and information on the emerging technological field of SES. In particular, this dissertation comprehensively assesses the costs and economic values of several SES technologies as well as presents a novel framework to define SES applications.

Zusammenfassung

Viele Länder haben in den letzten Jahren den Einsatz von erneuerbaren Energietechnologien (EE) gefördert um den steigenden Energiebedarf zu decken und gleichzeitig den CO₂-Ausstoß sowie die Abhängigkeit von fossilen Energiequellen zu verringern. Diese Förderungsmaßnahmen („Nachfrageinstrumente“ oder „Nachfragepolitik“) haben zwar einerseits effektiv den Ausbau von EE ermöglicht, sowie positive Effekte auf Innovation und Kosten von EE hervorgerufen. Jedoch führten die Nachfrageinstrumente für EE andererseits nicht nur zu hohen Kosten, sondern verringerten auch die technologische Vielfalt. Alternative Technologien, die bei Einführung der Nachfrageinstrumente nicht kostengünstig waren, konnten sich nicht im Markt etablieren. Somit resultierten die Nachfrageinstrumente oft in einen „Lock-in“ der kurzfristig kostengünstigsten Technologie. Zusätzlich zu diesen beiden Effekten fordert der rasante Ausbau von stark schwankender Windkraft und Photovoltaik, welcher durch die Nachfrageinstrumente entstanden ist, Stromqualität und Netzstabilität heraus. Neben Netzausbau und Nachfragesteuerung, können insbesondere stationäre Elektrizitätsspeicher (SES) mit Ihrer Fähigkeit Stromproduktion und –nachfrage zeitlich zu entkoppeln, den weiteren Ausbau von EE ermöglichen. Tatsächlich wurden in den letzten Monaten Fördermaßnahmen speziell für SES in verschiedenen Ländern implementiert.

Diese Dissertation zielt darauf ab das Verständnis zu verbessern, in welcher Weise der Gesetzgeber den Ausbau von SES fördern kann. Im Einzelnen wird untersucht wie die negativen Konsequenzen, die bei Nachfrageinstrumenten für EE beobachtet werden konnten (hohe Kosten und reduzierte technologische Vielfalt), im Fall von SES verringert werden können. Im Zuge dessen spielt eine Eigenschaft von SES eine besondere Rolle: Im Gegensatz zu den meisten EE, sind SES sogenannte „Multi-Purpose Technologien“ (MPT) da sie auf sehr verschiedene Weise und für viele verschiedene Anwender ökonomischen Wert erzeugen können und daher eine Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen haben. Obwohl diese Eigenschaft dem Gesetzgeber zusätzliche Freiheitsgrade in der Ausgestaltung der Fördermaßnahmen bietet, wurden deren praktische und theoretische Implikationen bisher nicht wissenschaftlich untersucht. Aus diesem Grund untersucht die vorliegende Dissertation die folgende Forschungsfrage: *Wie kann der Gesetzgeber den Ausbau von Multi-Purpose Technologien fördern ohne die technologische Vielfalt zu reduzieren und gleichzeitig die Kosten dieser Nachfragepolitik begrenzen?*

Um diese Forschungsfrage zu eruieren, baut die vorliegende Dissertation auf Erkenntnissen der Ökonomie und Innovationswissenschaften auf und setzt techno-ökonomische Modellierung von Energiespeichern sowie ökonometrische Analysen von Patentdaten ein. Insgesamt werden hierzu vier verschiedene wissenschaftliche Artikel präsentiert von denen jeweils zwei die Kosten der Nachfragepolitik und zwei den Zusammenhang zwischen Nachfragepolitik und technologischer

Vielfalt adressieren. Dabei untersucht der erste Artikel die Kosten von SES in verschiedenen Anwendungen. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die SES Kosten – und damit auch indirekt die Kosten diese Technologien zu unterstützen – einerseits noch sehr hoch sind, sich aber andererseits sehr stark über verschiedene Anwendungen unterscheiden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen, fügt der zweite Artikel den Kosten von SES eine Analyse über den ökonomischen Wert der Anwendungen hinzu um Implikationen von für eine kostengünstige Nachfrageförderung von SES abzuleiten. Im Gegensatz zu den ersten beiden Artikeln, fokussiert der dritte auf den Zusammenhang zwischen Nachfragepolitik und technologischer Vielfalt. Basierend auf einer Analyse der Verbreitung von technischem Wissen zwischen verschiedenen Technologien, identifiziert dieser ein hohes Risiko eines Lock-ins, falls die Nachfrageförderung nur eine Technologie erreichen würde. Auf Grundlage dieses Ergebnisses untersucht der vierte Artikel seinerseits den Wettbewerb zwischen SES Technologien in verschiedenen Anwendungen um Ideen für eine Nachfrageförderung zu entwickeln, die das Risiko eines Lock-ins minimieren.

Verschiedene Implikationen für den Gesetzgeber lassen sich aus diesen Ergebnissen ableiten. Die Kosten der Nachfragepolitik können im Fall von Multi-Purpose Technologien reduziert werden, wenn der Ausbau von Technologien sequentiell – basierend auf der Profitabilität der Technologien – in einzelnen Anwendungen unterstützt wird. Das Risiko eines verfrühten Lock-ins in eine einzelne Technologie kann dadurch reduziert werden, dass entweder Anwendungen unterstützt werden, die einen hohen Wettbewerb zwischen Technologien aufweisen, oder indem die Spezifität der Förderung im Hinblick auf Technologien oder Anwendungen angepasst wird. Außerdem kann eine Förderung von Forschungs- und Demonstrationsprojekten, die tendenziell spezialisiertes Wissen in Kernbereichen von Technologien generieren, die Entwicklung von einzelnen Technologien beschleunigen. Auf der anderen Seite würde eine Förderung von diversifiziertem Wissen in Randbereichen von Technologien den Wissensaustausch zwischen Technologien verstärken und dadurch das Lock-in Risiko reduzieren.

Insgesamt bietet diese Dissertation verschiedene Beiträge zu der bestehenden Literatur. Theoretische Beiträge resultierten aus der Definition und Diskussion von Multi-Purpose Technologien sowie aus der Einführung der Anwendungsperspektive in die Lock-in Literatur. Ein weiterer theoretischer Beitrag liegt in der – nach Einschätzung des Autors – ersten Studie zu den Einflussfaktoren von Wissenstransfers innerhalb und zwischen verschiedenen Technologien. Diese Studie kann nicht nur bestehende Widersprüche in der Literatur zur Diffusion von technischem Wissen auflösen, sondern verbindet auch zwei bisher getrennte Literaturströme. Methodische Beiträge können in einem Ansatz den Wert von SES in verschiedenen Anwendungen zu schätzen, einem Indikator, der das Lock-in Risiko durch Nachfrageförderung beschreibt, und dem Operationalisieren der Zentralität von Wissen durch die Produktarchitektur gefunden werden. Schließlich könnten verschiedene empirische

Ergebnisse dieser Dissertation, insbesondere in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Anwendungen von SES, von großem Wert für Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft sein.