

DISS. ETH NO. 21265

Fostering rural electrification – the case of renewable energy-based village grids in South East Asia

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of Doctor of Sciences

Presented by

NICOLA URSINA BLUM

MSc MTEC ETH Zurich

born 15.12.1982

citizen of Trub (BE)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Volker H. Hoffmann

Prof. Dr. Staffan Jacobsson

2013

Abstract

Providing the rural poor with access to modern energy services is a major challenge in developing countries striving for economic growth, social development and environmental integrity. Socially, developing countries suffer from higher poverty levels accompanied by greater inequality, faster-growing populations, more unsolved health issues and lower educational levels than developed countries. Economically, they struggle with a largely untrained workforce and a lack of public and private financial resources. Environmentally, developing countries have to juggle new industrial development with environmental precaution. A major environmental threat is climate change. Developing countries are often disproportionately affected by it, which poses challenges in terms of adaptation and mitigation. In an attempt to address these challenges in a concerted international effort, the United Nations defined the Millennium Development Goals (MDGs) in 2001. Currently the follow-up goals, the so called Sustainable Development Goals (SDGs), are under discussion.

An important lever to address the MDGs and SDGs is the provision of (renewable energy-based) electricity to a wider population. As of today, more than 1 billion people worldwide still lack access to electricity. Most of them are poor and live in rural areas in Africa and Asia. Access to electricity is a prerequisite for industrial progress and an increased standard of living for these people. Additionally, if the electricity is produced by means of renewable energies, it contributes to the reduction of CO₂ emissions, which is a global concern in the context of mitigating climate change.

Compared to the alternative rural electrification approaches (e.g., solar lanterns, stand-alone systems, diesel-based village grids and grid extension), renewable energy based village grids (RVGs) are - in light of the MDGs and SGDs - the most appropriate solution to provide rural poor with access to electricity. RVGs are decentralized electricity systems which power a rural village with electricity produced by renewable energy technologies. They are environmentally-friendly and allow for social infrastructure and productive use of electricity, in addition to electricity for household purposes. Despite the advantages of RVGs as a rural electrification approach, large-scale diffusion of RVGs has not yet taken place. So far literature has not provided sufficient and diversified insights on the reasons for the low diffusion rates. In this thesis I address this gap by considering the question: **“why is the diffusion of RVGs in developing countries low and how can it be advanced?”** for the case of Indonesia and Laos. The target of the thesis is to provide insights for practitioners such as investors, development specialists, and policy makers, as well as to improve existing theory and empirical data on the diffusion of (renewable energy) technology.

The question is tackled from three complementary perspectives: a techno-economic, investor's, and innovation systems perspective. While the techno-economic literature examines how diffusion of technology depends on relative prices, in the investor's perspective, individual firms are regarded as the central drivers of diffusion. Innovation systems literature, alternatively, understands diffusion as an

evolutionary process, where different actors are involved and decisions depend on additional variables apart from relative prices. These different perspectives complement each other and allow for practical (investor and policy) implications.

This dissertation makes three scientific contributions. First, as suggested by different scholars, the thesis applies different concepts and methods. The different concepts are reflected in the three applied perspectives. Depending on the perspective, I employ quantitative or qualitative methods. The second contribution is in terms of new, empirical data. New data on costs of RVGs and villager's willingness-to-pay in Indonesia is gained. National and international revenue sources for owners of RVGs in Indonesia are introduced and quantified. Additionally, it is the first research effort that models a village's electricity demand and the needed supply on an hourly base. The third contribution lies in enriching the *Technological Innovation System and functions* framework theoretically by applying the framework to a new, "extreme" case which significantly differs from analyzed cases. The thesis thereby contributes to the ongoing debates on the set and definition of *functions*, the *functions'* role in the system, the role of institutions, the role of geographical aspects, and the derivation of policy recommendations from a *TIS and functions* analysis.

From the combined insights of the four papers presented in this dissertation follows; first, the techno-economic argument – that RVGs do not diffuse because they are more expensive than alternative solutions – does not hold true. Second, by combining this insight with the contributions from the investor's and innovation systems perspective, I find that a major reason for the low diffusion of RVGs is their high complexity in technological and non-technological terms. For investors, development specialists and policy makers, this implies that managing this complexity is key to advancing the diffusion of RVGs. Investors, for example, can take measures such as managing stakeholders and their cultural diversity actively in order to reduce complexity. However, while some challenges can be addressed by the investors, in other areas policy intervention is required. For example, policy makers can consider a removal or redistribution of fuel and electricity subsidies, define and implement a stringent rural electrification strategy, fulfill a connector and translator role between their rural population and international actors and institutions, and invest in the country's educational system. The thesis then concludes with proposals for future research.

Zusammenfassung

Die ärmere Landbevölkerung mit Strom zu versorgen ist eine der grossen Herausforderungen, die sich Entwicklungsländern momentan stellt. Diese Länder streben nach Wirtschaftswachstum und sozialer Entwicklung bei kleinstmöglichem negativen Einfluss auf die Umwelt. In sozialer Hinsicht leiden Entwicklungsländer unter hoher Armut, grossen Einkommensschere, grossem Bevölkerungswachstum und tiefen Standards im Gesundheits- und Bildungsbereich. Aus ökonomischer Sicht sind die tiefen Ausbildungsniveaus von Arbeitskräften und der Mangel an öffentlichen und privaten finanziellen Mitteln ein Hindernis. Entwicklungsländer müssen ökonomisches Wachstum und Umweltfreundlichkeit unter einen Hut bringen. Eine grosse Herausforderung bezüglich letzterem ist der Klimawandel. Üblicherweise sind Entwicklungsländer stärker vom Klimawandel betroffen als Industrieländer, was sie dazu zwingt sich anzupassen und ihren eigenen Klimaeinfluss zu minimieren. Um die sozialen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Herausforderungen in Entwicklungsländern anzugehen, hat die UN im Jahr 2010 die Millennium-Entwicklungsziele formuliert. Momentan werden die Nachfolgeziele (nachhaltige Entwicklungsziele genannt) der im 2015 auslaufenden Millennium-Entwicklungsziele diskutiert.

Ein wichtiger Hebel, um die Millennium- und nachhaltigen Entwicklungsziele für die Landbevölkerung in Entwicklungsländern zu erreichen, ist der Zugang zu Elektrizität, welche auf erneuerbaren Energien basiert. Heute lebt weltweit immer noch mehr als 1 Milliarde dieser Landbevölkerung ohne Stromzugang, die meisten von ihnen in Asien und Afrika. Für sie ist Zugang zu Strom die Voraussetzung für industrielle und wirtschaftliche Tätigkeiten und damit auch für die Verbesserung ihres Lebensstandards. Zusätzlich hat Strom, der durch erneuerbare Energien produziert wird, den Vorteil, dass er kein CO₂ emittiert. Damit trägt er dazu bei, dass ein Land seinen negativen Klimaeinfluss limitieren kann.

Unter dem Aspekt der Millennium- und nachhaltigen Entwicklungsziele sind Dorfstromnetze, die auf erneuerbaren Energien beruhen, die geeignetste Technologie, um ländliche Gebiete mit Elektrizität zu versorgen. Zu den weniger geeigneten Alternativen zählen Solarlaternen, Systeme für den einzelnen Haushalt, auf Diesel basierende Dorfstromnetze oder der Ausbau des nationalen Stromnetzes. Dorfstromnetze sind dezentrale, kleine Systeme, die ein Dorf mit erneuerbarem Strom versorgen. Sie sind umweltfreundlich und produzieren genügend Strom für gesellschaftliche und industrielle Bedürfnisse sowie für Haushalte. Trotz der Vorzüge von Dorfstromnetzen als Elektrifizierungslösung hat ihre grossflächige Verbreitung noch nicht stattgefunden. Auch in der Literatur wird das Thema nur unzureichend und zu wenig differenziert beleuchtet. In meiner Dissertation widme ich mich deswegen am Beispiel von Indonesien und Laos der Frage: **“Wieso ist die Verbreitung von Dorfstromnetzen in Entwicklungsländern so tief und wie kann sie erhöht werden?”** Das Ziel der Dissertation ist es, einerseits Praktikern wie zum Beispiel Investorinnen, Investoren, Personen aus dem Bereich der

Entwicklungszusammenarbeit sowie Politikerinnen und Politikern einen Einblick in die Problematik zu ermöglichen, und andererseits bestehende Theorien und empirische Daten zum Thema der Diffusion von erneuerbaren Energie-Technologien zu erweitern.

Die Frage wird aus drei komplementären Perspektiven beleuchtet: einer technologisch-ökonomischen Perspektive, einer Investoren- und einer Innovationssystem-Perspektive. Während die technologisch-ökonomische Perspektive untersucht, wie die Verbreitung einer Technologie von unterschiedlichen Technologiekosten abhängt, betrachtet die Investoren-Perspektive die Verbreitung aus Firmensicht. Im Gegensatz dazu versteht die Innovationssystem-Perspektive die Verbreitung einer Technologie als evolutionären Prozess, bei dem verschiedene Akteure involviert und wo Entscheidungen nicht nur auf Grund von Kostenoptimierungen gefällt werden. Die verschiedenen Perspektiven ergänzen sich gegenseitig und ermöglichen Schlussfolgerungen für Praktiker.

Die Dissertation umfasst drei wissenschaftliche Beiträge. Erstens, wie von verschiedenen Wissenschaftlern vorgeschlagen, wendet die Arbeit unterschiedliche Methoden und theoretische Konzepte an, um die Verbreitung einer Technologie zu untersuchen. Die unterschiedlichen Konzepte spiegeln sich in den drei Perspektiven. Die Wahl der Methoden richtet sich nach der jeweiligen Perspektive, wobei quantitative und qualitative Forschungsmethoden zur Anwendung kommen. Der zweite Beitrag liegt in der Bereitstellung von neuen, empirischen Daten: Daten für die Kosten von Dorfstromnetzen sowie Daten über die Zahlungsbereitschaft von Dorfbewohnern. Zusätzlich wurden nationale und internationale Einkommensquellen für Dorfstromnetzbetreiber identifiziert und quantifiziert. Weiter wurden zum ersten Mal die Stromnachfrage und Stromproduktion in einem Dorf stundengenau simuliert. Der dritte wissenschaftliche Beitrag der Dissertation bezieht sich auf die konzeptionelle Weiterentwicklung des *Technological Innovation System and functions*-Konzepts. Dies geschieht, indem das Konzept auf einen neuen, "extremen" Fall, der sich stark von bisherigen Anwendungsbeispielen unterscheidet, angewendet wird. Die Schlussfolgerungen daraus tragen zur aktuellen theoretischen Debatte über die Auswahl und die Definitionen der *functions*, ihre Rolle im System, die Rolle von Institutionen und geographischen Aspekten, sowie zur Verbesserung der aus einer *Technological Innovation System and functions*-Analyse abgeleiteten Empfehlungen für Politikerinnen und Politiker bei.

Aus den kombinierten Erkenntnissen der vier in dieser Dissertation präsentierten wissenschaftlichen Artikeln kann man Folgendes für die Praxis schliessen: Erstens, das technologisch-ökonomische Argument – dass Dorfstromnetze sich nicht verbreiten, weil sie teurer als alternative Lösungen sind – bestätigt sich nicht. Indem man in einem nächsten Schritt die Erkenntnisse der Investoren- und Innovationssystemperspektiven einbezieht, findet man heraus, dass ein Hauptgrund für die schlechte Verbreitung von Dorfstromnetzen ihre hohe technologische und nicht-technologischer Komplexität ist. Für InvestorInnen, Investoren, Personen aus dem Bereich der Entwicklungszusammenarbeit sowie Politikerinnen und Politiker bedeutet dies, dass die Bewältigung dieser Komplexität der Schlüssel zur

Verbreitung von Dorfstromnetzen ist. Investorinnen und Investoren beispielsweise können durch die aktive Kommunikation mit den verschiedenen Akteuren – unter Berücksichtigung der kulturellen Hintergründe – die Komplexität der Probleme reduzieren. Während gewisse Herausforderungen von Investorinnen und Investoren selbst bewältigt werden können, braucht es in anderen Bereichen regulatorische Änderungen. So können politische Entscheidungsträgerinnen und -träger die Komplexität reduzieren, indem sie Diesel- und Stromsubventionen entfernen oder umverteilen, eine stringente Elektrifizierungsstrategie definieren und implementieren, zwischen ihrer Bevölkerung und internationalen Akteuren als Bindeglied und Übersetzer tätig sind und indem sie das Bildungssystem ausbauen. Die Dissertation endet mit Vorschlägen für weiterführende Forschung.