

Paul Simon Bertheau

The role of renewable energy for low-carbon development on small Philippine islands

A mixed methods approach

The role of renewable energy for low-carbon development on small Philippine islands – a mixed methods approach

Doctoral thesis submitted to the
Department of Energy and Environmental Management
Europa-Universität Flensburg

In fulfilment of the degree of Dr. rer. pol. in Economics

Presented by Paul Simon Bertheau

Supervisor and first examiner: Prof. Dr. Bernd Möller
Second examiner: Prof. Dr. Christoph Menke

Submitted the 10th of June, 2020.

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Paul Simon Bertheau

**The role of renewable energy for low-carbon
development on small Philippine islands**

A mixed methods approach

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Flensburg, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7831-2

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Executive summary

Islands are particularly threatened by the negative effects of climate change, while often heavily dependent on fossil fuels for their power supply. At the same time, many islands are rich in renewable resources and are considered as ideal niche environments for a rapid implementation of renewable energy. The islands of the Philippines combine these characteristics and serve as the case study for this dissertation. The Philippines is an archipelago of more than 7,000 islands and is one of the most affected countries by climate change induced threats such as rising sea levels and an increasing frequency of extreme weather events. While the largest islands form a centralized grid system, most of the smaller islands are either supplied by fossil fuel-based generators or lack formal electricity supply. The dependence on fossil fuels implies high power generation costs, low energy security, environmental pollution and slower socio-economic development on these small islands. The challenge facing these off-grid islands is to both improve electricity supply through the use of renewable energy technologies and provide access to electricity on non-electrified islands in an affordable, reliable and sustainable way.

This dissertation investigates the role of renewable energy for the improvement and provision of power supply in the off-grid island sector of the Philippines. The first objective is the systematic assessment of the cost-effectiveness of renewable energy for the hybridization of existing fossil fuel powered generation capacity as well as the electrification of islands with no formal electricity supply. The second objective is to identify challenges to the deployment of renewable energy based island grids and analyze the impact of renewable energy implementation on local development outcomes and the Sustainable Development Goals. Finally, the purpose of the dissertation is to present suitable approaches and recommendations for the low-carbon development of the Philippine off-grid sector.

An interdisciplinary mixed methods approach combining energy economics and social sciences is applied to address these objectives. The main focus in the field of energy economics is the simulation and optimization of energy supply options to derive investment requirements for cost-benefit analyses. In addition to extensive data collection in the Philippines, geospatial analyses and cluster analyses are used to derive necessary input data for applied economic analyses of energy systems. Quantitative and qualitative methods from the social sciences complement the overall research approach through field research, the development and implementation of a household questionnaire survey, focus group discussions and expert interviews with relevant stakeholders. The research findings are presented along five published peer-reviewed publications of which each contributes a piece to addressing the overall research hypothesis of this dissertation: *Renewable energy based island grids represent a cost-effective, environmentally sound and socially acceptable development pathway for the electricity supply of Philippine islands.*

The results of the paper can be summarized as the following: First, energy system simulations of solar photovoltaic and lithium-ion battery based hybridization of all existing diesel based island grids reveal an average cost reduction potential of 0.02 USD/kWh at an average RE share of 24%, which would mitigate the combustion of more than 100 million liters of diesel fuel annually. The results show that renewable based hybridization is cost-effective under conservative assumptions and without subsidies. Furthermore, scenario and sensitivity analyses applying input parameters more favorable for renewable energy introduction indicate a much larger potential towards a 50% renewable energy share showing the cost-effectiveness of RE solutions compared to fossil fuels.

Second, the development of a geospatial approach for evaluating the investment costs of interconnection of all island grids by means of submarine power cables shows that investment costs would be more than four times higher than those for decentralized renewable energy island

grid development on the national scale. At the sub-national scale, cost comparison across island groups indicates that 7 out of 30 groups could be more cost-effectively interconnected to the main grid. Three island groups are specifically recommended for more detailed investigation of submarine interconnection based on proximity to the grid and high electricity demand. Such grid optimization efforts could reduce subsidy requirements and lead to more efficient allocation of funds for the development of renewable energy power supply systems on other island grids.

Third, geospatial analysis methods are applied to identify a priority list of not-electrified islands relevant for renewable energy island grid development. In total, 649 islands with a population of 650,000 inhabitants are identified, representing 12.5% of the population lacking access to electricity. A comparison of technologies for 100% renewable energy power supply finds solar photovoltaics in combination with lithium-ion battery storage as the main components while wind power is supplementary due to higher seasonality. Power generation costs are in the range of 0.5 – 0.6 USD/kWh under the applied cost assumptions. Decreasing supply reliability by 1% allows for a 20% reduction in generation costs and the use of excess electricity to power deferrable loads, such as water purification or cold storage, holds further potential for cost reduction.

Fourth, a detailed case study of an existing renewable energy island grid reveals that the introduction of renewable energy increased sustainability (high renewable energy share), affordability (50% tariff reduction) and reliability (24/7 power supply) compared to the status quo of diesel power generation. Further, findings from a household survey, covering 70% of all supplied households, suggests that the majority of households perceive a positive impact on access to information and communication, and provision of health and educational services compared to previous power supply. Although the social acceptance of the project is high it is found that wealthier households are more capable of generating new income through the improved power supply which poses a risk of increasing inequality within island communities.

Fifth, focusing on the same case study presented but applying a different perspective, challenges for an electric cooperative in introducing renewable energy to existing energy systems are investigated through expert interviews, surveys and focus group discussions. The findings reveal slow issuance of subsidies and permits, lack of access to capital, and lack of technical expertise as the main challenges for a wider adoption of renewable energy development through electric cooperatives.

The following recommendations can be derived from these research findings: First, policy makers should first determine which off-grid island groups are suitable for interconnection to the centralized grid. This dissertation provides a preliminary approach for this decision-making process and recommends three specific island groups where detailed feasibility analysis should be conducted. Second, subsidies saved through off-grid island interconnection should be reinvested into the introduction of renewable energy supply in existing diesel-based island grids. The dissertation highlights the cost-effectiveness of such hybridization and additionally indicates islands with the highest cost saving potential. Third, the extension of service hours should be realized through the implementation of renewable energy on smaller islands. Furthermore, the electrification of not-electrified islands should also be conducted with 100% renewable energy systems to avoid further implementation of expensive diesel generators. This dissertation provides detailed information of the location and characteristics of such islands. Finally, electric cooperatives should be equipped with capabilities to implement the aforementioned systems through providing technical expertise, access to capital and streamlining permission processes.

Zusammenfassung

Inseln sind durch die negativen Auswirkungen des Klimawandels besonders bedroht, während sie für ihre Energieversorgung stark von fossilen Brennstoffen abhängig sind. Gleichzeitig sind viele Inseln reich an erneuerbaren Ressourcen und gelten als ideale Nischenumgebungen für eine umfassende Einführung erneuerbarer Energien. Die Philippinen dienen als Fallstudie dieser Dissertation und sind durch die oben genannten Merkmale charakterisiert. Das Land umfasst mehr als 7.000 Inseln und ist eines der am stärksten von den durch den Klimawandel verursachten Bedrohungen betroffenen Ländern, wie dem Anstieg des Meeresspiegels und einer zunehmenden Häufigkeit extremer Wetterereignisse. Während die größten Inseln durch ein zentrales Stromnetz verbunden sind, werden die meisten kleineren Inseln ausschließlich von Dieselgeneratoren versorgt oder haben keinerlei Stromversorgung. Die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen führt zu hohen Stromerzeugungskosten, einer geringen Energiesicherheit, hoher Umweltverschmutzung und verlangsamt die sozioökonomische Entwicklung des Landes. Die Herausforderung auf diesen Inseln, die den Off-Grid-Sektor des Landes bilden, besteht darin, die Stromversorgung durch den Einsatz erneuerbarer Energien zu verbessern und gleichzeitig einen auf erneuerbaren Energien basierenden Zugang zu Strom auf noch nicht elektrifizierten Inseln auf bezahlbare, zuverlässige und nachhaltige Weise zu ermöglichen.

In dieser Dissertation wird daher die Rolle erneuerbarer Energien für die Verbesserung und Bereitstellung der Stromversorgung im Off-Grid-Sektor der Philippinen untersucht. Das erste Ziel ist die systematische Bewertung der Kosteneffektivität erneuerbarer Energien für die Hybridisierung fossiler Brennstoffe und für die Elektrifizierung abgelegener Inseln. Das zweite Ziel ist die Identifizierung von Herausforderungen bei der Einführung von erneuerbaren Energien auf Inselnetzen, die Analyse der Auswirkungen der Einführung erneuerbarer Energien auf die lokale Entwicklung und die *Sustainable Development Goals*. Schlussendlich ist das übergeordnete Ziel der Dissertation, geeignete Ansätze und Informationen für die Entwicklung erneuerbarer Energien im philippinischen Off-Grid-Sektor zu präsentieren.

Um die Ziele zu erreichen, wendet die Dissertation einen interdisziplinären Methodenansatz an, der Energieökonomie und Sozialwissenschaften kombiniert. Schwerpunkt im Bereich der Energieökonomie ist die Simulation und Optimierung von Energieversorgungsoptionen zur Abschätzung des Investitionsbedarfs für Kosten-Nutzen-Analysen. Neben einer umfangreichen Datenerhebung und Stakeholder-Konsultationen auf den Philippinen tragen geografische Analysen und Clusteranalysen zum energieökonomisch basierten Ansatz bei, der eine Inputdatenerhebung und Charakterisierungsanalyse ermöglicht. Der auf den Sozialwissenschaften basierende Schwerpunkt ergänzt den gesamten Forschungsansatz mit quantitativen und qualitativen Methoden. Dazu gehören Feldforschung auf abgelegenen Inseln, die Entwicklung und Durchführung einer Haushaltsumfrage, Fokusgruppendifkussionen und Experteninterviews.

Die Forschungsergebnisse werden anhand von fünf veröffentlichten Publikationen vorgestellt, von denen jede einen Beitrag zur Beantwortung der allgemeinen Forschungshypothese dieser Dissertation leistet: *Auf erneuerbaren Energien basierende Inselnetze stellen einen kostengünstigen, umweltverträglichen und sozialverträglichen Entwicklungspfad für die Stromversorgung der philippinischen Inseln dar.*

Erstens zeigt die Anwendung der Energiesystemsimulation für eine Solar-Photovoltaik- und Lithium-Ionen-Batterie-basierte Hybridisierung aller bestehenden Diesel-Inselnetze ein durchschnittliches Kostensenkungspotenzial von 0,02 USD/kWh bei einem durchschnittlichen Anteil erneuerbarer Energien von 24%. Dadurch könnte die Verbrennung von mehr als 100 Millionen Dieselmotoren pro Jahr vermieden werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die auf erneuerbaren Energien basierende Hybridisierung unter konservativen Annahmen und ohne

Subventionen kosteneffizient ist. Darüber hinaus weisen Szenario- und Sensitivitätsanalysen, die günstigere Kosten für erneuerbare Energie annehmen, auf ein viel größeres Potenzial in Richtung eines 50%-Anteils erneuerbarer Energien hin.

Zweitens zeigt die Entwicklung eines geografischen Ansatzes zur Abschätzung der Investitionskosten für die Verbindung aller Inselnetze durch Unterwasserkabel, dass die Investitionskosten mehr als viermal so hoch wären wie die Investitionen für die Entwicklung dezentralisierter, auf erneuerbarer Energien basierender Inselnetze auf nationaler Ebene. Ein vereinfachter Kostenvergleich auf einer höher aufgelösten Ebene zeigt jedoch, dass 7 von 30 Inselgruppen kosteneffizienter an das Hauptnetz angeschlossen werden können. Drei dieser Inselgruppen werden für eine detailliertere Untersuchung einer Anbindung an das Hauptnetz, aufgrund der kurzen Distanz der benötigten Verbindung und des hohen Strombedarfs empfohlen. Dadurch könnten Mittel aus einem Subventionsprogramm für die Stromversorgung abgelegener Gebiete, für die Entwicklung erneuerbarer Energien in anderen Inselnetzen freigegeben werden.

Drittens können durch geografische Analysen 649 nicht-elektrifizierte Inseln identifiziert werden, auf denen eine Implementierung von auf erneuerbaren Energien basierenden Inselnetzen sinnvoll erscheint. Diese umfassen eine Bevölkerung von rund 650.000 Einwohnern, was einem Anteil von 12,5% der Bevölkerung ohne Zugang zu Elektrizität auf den Philippinen entspricht. Eine Simulation von 100% erneuerbaren Systemen für die Elektrifizierung zeigt auf, dass Photovoltaik in Kombination mit Lithium-Ionen-Batteriespeichern die Hauptkomponente dieser Systeme ist, während die Windkraft aufgrund von saisonaler Verfügbarkeit nur ergänzend eingesetzt werden kann. Die Stromerzeugungskosten liegen unter den angewandten Kostenannahmen im Bereich von 0,5 - 0,6 USD/kWh. Eine Verringerung der Versorgungszuverlässigkeit um 1% ermöglicht jedoch eine Senkung der Erzeugungskosten um 20% und die Nutzung von überschüssigem Strom durch flexibel einsetzbare elektrische Lasten, wie Trinkwasseraufbereitungsanlagen oder Kühllhäuser, birgt weiteres Potenzial für Kostensenkungen.

Viertens wird durch eine Fallstudienanalyse, die sich auf ein realisiertes erneuerbares Inselnetz konzentriert, gezeigt, dass die Implementierung erneuerbarer Energien die Nachhaltigkeit (hoher Anteil erneuerbarer Energien), Bezahlbarkeit (50 % Tarifsenkung) und Zuverlässigkeit (24/7-Stromversorgung) im Vergleich zum Status quo der Dieselstromerzeugung erhöht. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Haushaltsbefragung, die 70% aller versorgten Haushalte abdeckt, dass die Mehrheit der Haushalte eine positive Auswirkung auf den Zugang zu Information und Kommunikation sowie auf die Bereitstellung von Gesundheits- und Bildungsdienstleistungen wahrnimmt. Obwohl die soziale Akzeptanz des Projekts hoch ist, wird festgestellt, dass wohlhabendere Haushalte durch die verbesserte Stromversorgung eher in der Lage sind, neues Einkommen zu generieren, was die Gefahr einer zunehmenden Ungleichheit innerhalb der Inselgemeinschaften birgt.

Fünftens, basierend auf derselben Fallstudie jedoch mittels anderer Perspektiven, werden die Herausforderungen für eine Stromgenossenschaft bei der Implementierung erneuerbarer Energien durch Experteninterviews, Umfragen und Fokusgruppendifkussionen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die langsame Vergabe von Subventionen und Genehmigungen, der mangelnde Zugang zu Kapital und der Mangel an technischem Fachwissen die Hauptherausforderung für eine breitere Einführung der Entwicklung erneuerbarer Energien durch Stromgenossenschaften darstellen.

Schließlich werden auf der Grundlage der Forschungsergebnisse Empfehlungen abgeleitet: Zunächst sollten die politischen Entscheidungsträger Inseln für den Anschluss an die Hauptnetze definieren. Dafür bietet diese Dissertation einen Kostenbewertungsansatz und

empfiehlt spezifische Inseln. Subventionen, die durch den Anschluss an das Hauptnetz eingespart werden, sollten in die Implementierung erneuerbarer Energien auf bestehenden Inselnetzen reinvestiert werden. Die Dissertation hebt die Kosteneffizienz einer solchen Hybridisierung hervor und zeigt zusätzlich Inseln mit dem höchsten Kosteneinsparungspotenzial im Vergleich zur reinen Dieselstromerzeugung auf. Aus dieser Gruppe sollten Inseln mit dem höchsten Strombedarf zuerst in Betracht gezogen werden, um die Minderung der Dieselmotorenverbrennung zu maximieren. Eine Verlängerung der Stromversorgungszeiträume sollte durch die Einführung erneuerbarer Energie auf kleineren Inseln realisiert werden, da eine höhere Stromnachfrage das Potential für erneuerbare Energien erhöht. Die Elektrifizierung von nicht versorgten Inseln sollte mit rein erneuerbaren Energiesystemen durchgeführt werden, und diese Dissertation liefert detaillierte Informationen über die Lage und die Eigenschaften dieser Inseln. Wichtig für eine erfolgreiche Umsetzung ist jedoch die Integration von Komponenten, die essentielle Dienstleistungen für abgelegene Gemeinden bereitstellen, wie Trinkwasseraufbereitungsanlagen oder Kühllhäuser, da dadurch die Wirtschaftlichkeit von Elektrifizierungsprojekten verbessert und gleichzeitig zunehmende Ungleichheiten innerhalb der Inselgemeinschaften vermieden werden können. Schließlich sollten Stromgenossenschaften befähigt werden, die vorgestellten Systeme umzusetzen, was durch die Bereitstellung von technischem Fachwissen, Zugang zu Kapital und die Rationalisierung von Genehmigungsverfahren ermöglicht werden kann.

Table of contents

List of appended publications.....	v
List of figures	vi
List of tables	viii
List of equations	x
Abbreviations and nomenclature.....	xi
Acknowledgement.....	xiii
About the author.....	xiii
1. Introduction	1
1.1. The challenge of sustainable energy supply on islands	1
1.2. The role of islands in socio-technical transition research	2
1.3. The case study country: The Philippines	3
1.4. The energy sector of the Philippines.....	4
1.4.1. Overview on off-grid island sector.....	6
1.4.2. Regulatory framework of the off-grid island sector	8
1.4.3. Literature review of renewable energy development in the off-grid island sector.....	10
1.5. The technological options for sustainable energy supply on off-grid islands.....	11
1.5.1. Stand-alone solutions.....	12
1.5.2. Decentralized solutions.....	12
1.5.3. Centralized solutions	13
1.6. The research questions and structure of the thesis.....	14
2. Resilient solar energy island supply to support SDG7 on the Philippines: Techno-economic optimized electrification strategy for small islands.....	19
2.1. Introduction.....	20
2.2. Overview of Philippine islands' energy situation.....	20
2.3. Material and methods.....	23
2.3.1. Data sources and description	23
2.3.2. Energy system model.....	23
2.3.3. Load data	24
2.3.4. Renewable resources	25
2.3.5. Technical and economic input data	26
2.4. Results and discussion	26
2.4.1. Scenario 0 - status quo: current demand.....	26

2.4.2.	Scenario 1–24/7 supply: extension to 24 h supply for all SIIGs	27
2.4.3.	Scenario 2 – load growth: addition of 10 years load growth to scenario 1..	29
2.4.4.	Sensitivity analyses.....	31
2.5.	Conclusions.....	35
2.6.	Annex.....	36
2.7.	References.....	42
3.	Electricity sector planning for the Philippine islands: Considering centralized and decentralized supply options	43
3.1.	Introduction.....	43
3.1.1.	The electricity sector in the Philippines.....	43
3.1.2.	Submarine power cables and hybrid electricity systems	43
3.2.	Methods	43
3.2.1.	Small isolated island grid landscape.....	43
3.2.2.	Estimation and projection of electricity demand	43
3.2.3.	Submarine power cable interconnection – geospatial analysis.....	43
3.2.4.	Renewable energy- based hybrid system development: Electricity system optimization	43
3.3.	Results.....	50
3.3.1.	Submarine cable interconnection.....	50
3.3.2.	Renewable energy – based hybrid systems	51
3.3.3.	Least-cost comparison: Recommendations for electricity sector development.....	53
3.3.4.	Sensitivity analysis of submarine cable costs and electricity demand.....	53
3.4.	Discussion.....	55
3.5.	Conclusion	55
3.6.	References.....	56
4.	Supplying not electrified islands with 100% renewable energy based micro grids: A geospatial and techno-economic analysis for the Philippines	57
4.1.	Introduction.....	57
4.2.	Material and methods.....	57
4.2.1.	Geospatial analysis	59
4.2.2.	Cluster analysis.....	60
4.2.3.	Energy system simulation	60
4.3.	Results.....	62
4.3.1.	Geospatial analysis	62
4.3.2.	Cluster analysis.....	63
4.3.3.	Energy system simulation	63
4.4.	Discussion.....	68

4.5.	Conclusion	69
4.6.	References.....	69
5.	Assessing the impact of renewable energy on local development and the Sustainable Development Goals: Insights from a small Philippine island.....	72
5.1.	Introduction.....	72
5.2.	Background.....	72
5.2.1.	Global context: Energy access and the Sustainable Development Goals	72
5.2.2.	Country context: Energy access in the Philippines.....	72
5.2.3.	Case study context: Cobrador Island Solar – Diesel Project	72
5.3.	Material and methods.....	72
5.3.1.	Questionnaire design	72
5.3.2.	Survey design	72
5.3.3.	Household questionnaire survey.....	72
5.3.4.	Statistical data analysis	72
5.3.5.	Limitations.....	72
5.4.	Results.....	72
5.4.1.	Socio-economic characteristics of households	72
5.4.2.	Electricity consumption patterns	72
5.4.3.	Electric appliances	81
5.4.4.	Perceived impact of SDG#7 intervention	81
5.5.	Discussion.....	82
5.5.1.	Implications for energy access planning and SDG#7	82
5.5.2.	Implications for addressing further sustainable development goals	83
5.5.3.	Implications for addressing poverty and inequality.....	84
5.5.4.	Contextualization of findings	84
5.6.	Conclusion and recommendations	84
5.7.	References.....	85
6.	Challenges for implementing renewable energy in a cooperative-driven off-grid system in the Philippines	87
6.1.	Introduction.....	87
6.2.	Background: Low carbon energy development in the Philippines	87
6.2.1.	Renewable energy and island electrification	87
6.2.2.	Remote island landscape & energy access in the Philippines	90
6.2.3.	Policy framework for low carbon energy development in the Philippines..	90
6.2.4.	Case study: Electric cooperatives as driver for low carbon energy development.....	91
6.3.	Material and methods.....	91
6.3.1.	Expert interviews	91

6.3.2.	Focus group discussion.....	92
6.3.3.	Household survey questionnaire.....	92
6.4.	Results and Discussion	93
6.4.1.	Findings from transdisciplinary research: Risks and uncertainties.....	93
6.5.	Conclusions.....	98
6.6.	References.....	99
7.	Synthesis.....	101
7.1.	Summary and discussion of research results	101
7.2.	Main conclusions	105
7.3.	Policy recommendations.....	106
7.4.	Scientific contributions, limitations and future research outlook	107
7.4.1.	Methodological contributions	107
7.4.2.	Empirical contributions	108
7.4.3.	Contribution to capacity development.....	108
7.4.4.	Research limitations	109
7.4.5.	Future research outlook	110
7.5.	Impact of dissertation.....	111
	Bibliography.....	113
	Eidesstattliche Erklärung.....	120