

DISS. ETH NO. 25559

***Adoption and Impacts of Renewable Energy
Evidence from a Randomized Controlled Trial
in Rural Kenya***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Adina Esther Rom

*M.A. in Public Administration in International Development
Harvard University*

born on 28.06.1985

citizen of
Zurich

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. Isabel Günther, Examiner
Prof. Dr. Lorenzo Casaburi, Co-Examiner
Prof. Dr. Edward Miguel, Co-Examiner*

2018

Summary

Human-driven climate disruption and widespread energy poverty are among the major challenges of our time (Alstone, 2015; SEAll, 2017). An estimated 1.1 billion people remain without access to modern energy, most of whom rely on biomass and fossil fuels for lighting, cooking, and heating — energy sources that lead to indoor air pollution and global warming (SEAll, 2017; WHO, 2016). Policy makers, entrepreneurs, and researchers across the globe place high hopes on renewable energy, particularly off-grid solar, to provide cheap and clean energy to those without access to the electric grid. The hope is that off-grid solar can reduce harmful and warming emissions from kerosene combustion and, at the same time, improve access to modern energy for unelectrified households. Despite this excitement, there is still little empirical evidence that there is demand for this technology solution, that it brings about the hoped for environmental and health effects, and that it confers private returns. It seems particularly relevant to evaluate the impact of this technology in a real-world setting since, previously, both private and environmental gains from novel technologies, such as cookstoves, have been overestimated (Hanna, Duflo & Greenstone, 2016).

This thesis investigates take-up, use, and impacts of off-grid solar lighting in rural Kenya. To this end we conducted a randomized control trial with over 1,400 households. We begin by providing an analysis of the demand for solar lights, their environmental and health effects as well as the private returns to households (Chapter 2, joint work with I. Günther). We find that access to a solar light leads to a reduction in kerosene consumption of over 1.4 liters per month, curbing emissions at a cost of less than US \$6 per ton of CO₂ equivalent. This cost is low compared with the frequently cited Social Cost of Carbon (SCC) of US \$50 per ton of CO₂equivalent (Revesz et al., 2017; IWG, 2015). Children’s symptoms related to dry eye disease and respiratory illnesses reduce by about a fourth standard deviation and a third standard deviation, respectively. In addition, households save around 2-3% of their monthly cash expenditure. However, we do not find any effect on children’s test scores. Finally, we find that reducing transaction costs increases demand 19% to 44% at a market price of US \$9, however, large price subsidies (over 55%) are needed to increase adoption rates to 70%. Price also does not seem to affect use. We conclude this chapter by suggesting that environmental and health effects combined with the high price sensitivity of demand and the fact that subsidies do not decrease use might justify subsidies in some settings.

The impact of solar lights on rural households and their environment depends heavily on whether households actually use them over time, which, as can be seen from the example of clean cookstoves, is not always the case (Hanna, Duflo & Greenstone, 2016). Measuring technology usage can be challenging, especially if respondents believe that it is socially desirable to use a device (social desirability bias). In this case, they might overreport use, which would lead to biased results. This bias has been found in several studies of technology adoption in developing countries (Wilson et al., 2016; Thomas et al., 2013). To address social desirability bias and other measurement issues, we used sensors to measure the use of solar lights. The sensors were developed for this study by an engineering team.

Chapter 3 (joint work with I. Günther and Y. Borofsky) focuses on information provided by sensor data. Specifically, we deployed sensors to gather an objective measure of solar light use. We then compared this data with survey data in order to analyze the extent to which survey data is limited by systematic and/or random error and discuss what type of questions provided more accurate answers. We learn from sensor data that households used solar lights almost every day, for four hours per day on average, mostly in the evening and the morning hours. Furthermore, we find that, on average, self-reported estimates of solar light use are very similar to sensor measurements, however, the correlation of estimates at the individual household level are weak, suggesting that random errors are large. Our findings indicate that households that used the solar lights infrequently were more likely to overreport, whereas those who used them a lot were more likely to underreport use. We also find that asking about general usage provided more accurate information than asking about disaggregated use for each hour of the day. Finally, and as the Hawthorne effect would predict, frequent visits from surveyors to a random subsample increased solar light use initially, but it had no long-term effects. Due to the novelty of both affordable solar lighting and the sensors used, this study is the first to both use sensors to study solar light use and compare sensor data with survey data at a large scale. One of the key findings of Chapter 2 is that emissions reductions might justify subsidizing solar lights in some contexts, however, temporary subsidies can have complex and contradictory effects on take-up and use. Chapter 4 discusses the direct and indirect implications of subsidies on take-up and use in more detail. We begin by analyzing how subsidies affect use. They could lead to lower use, since paying a lower price might lead adopters to value the product less (sunk cost effect), or they might lead to poor targeting since households that do not

actually need the subsidy might use it to purchase the product (selection effect). Social interaction effects could also affect adoption, as people might learn from early adopters or imitate them. We find that subsidies sharply increase demand for solar lights without compromising use, thus we do not find evidence for sunk cost or selection effects. Further, our results suggest that social interaction effects might increase the price sensitivity of demand, whereby demand decreases among households that received an offer to purchase at a high price, but tends to increase among households that received the low price. These findings have two implications. First, they suggest that social learning about the limited private returns are more likely than imitation, since in the latter case we would have expected to see increased adoption across the board. Second, they imply that social interaction effects are complements for subsidies, but that they do not increase adoption on their own.

To summarize, we find that in our setting solar lights are used a lot and substantially reduce kerosene use. They reduce warming emissions at a low cost and provide cheaper and better quality light to rural households. Moreover, we observe that further price reductions are needed to increase adoption rates above 50% and that subsidies do not affect use. Taken together, these findings suggest that subsidizing off-grid solar can be justified in some settings.

Zusammenfassung

Klimawandel und unzureichender Zugang zu Energie gehören zu den grossen Herausforderungen unserer Zeit (Alstone, 2015; SEAll, 2017). Geschätzte 1.1 Milliarden Menschen haben noch keinen Zugang zu moderner Energie, sondern nutzen Biomasse und fossile Brennstoffe für Dinge wie Beleuchtung, Kochen und Heizen. Diese Energiequellen führen zu Luftverschmutzung und tragen zur Klimaerwärmung bei (SEAll, 2017; WHO, 2016). Politische Entscheidungsträgerinnen und -träger, Unternehmen sowie Forschende aus der ganzen Welt setzten grosse Hoffnung in erneuerbare Energien und darin, dass netzferne Solarenergie Menschen ohne Zugang zu Strom mit kostengünstiger und sauberer Energie versorgen kann. Die Hoffnung ist, dass netzferne Solarenergie schädliche und erderwärmende Kerosinmissionen reduziert und nicht-elektrifizierten Haushalten Zugang zu moderner Energie ermöglicht. Derzeit gibt es allerdings wenig empirische Evidenz über die Nachfrage nach dezentralisierter Solarenergie und darüber, ob die erhofften Umwelt- und Gesundheitseffekte auch tatsächlich erreicht werden können. Ferner ist wenig über deren privaten Renditen auf der Haushaltsebene bekannt. Um diese Fragen zu beantworten, ist es erforderlich die Wirkung der Technologie an ihrem Anwendungsort zu testen, denn frühere Studien haben gezeigt, dass sowohl private Erträge als auch Umweltauswirkungen (z.B. bei verbesserten Kochöfen) überschätzt wurden (Hanna, Duflo & Greenstone, 2016).

In diesem Zusammenhang, untersucht diese Dissertation die Nachfrage, Nutzung und Auswirkungen von netzfernen Solarlichtern auf Haushalte im ländlichen Kenia. Zu diesem Zweck haben wir eine randomisierte Studie mit über 1,400 Haushalten durchgeführt. Wir beginnen mit einer Analyse der Nachfrage für Solarlichter, deren Umwelt- und Gesundheitseffekte sowie deren privaten Renditen (Kapitel 2, verfasst mit I. Günther). Erstens finden wir, dass der Zugang zu Solarlichtern zu einer Reduktion von Kerosinkonsum von 1.4 Litern pro Haushalt und Monat führt, was Emissionen zu einem Preis von weniger als US \$6 pro Tonne CO₂-Äquivalente reduziert. Dieser Preis ist verglichen mit den oft zitierten sozialen Kosten von US \$50 per Tonne CO₂ tief (Revez et al., 2017; IWG, 2015). Zweitens nehmen Symptome von Augentrockenheit und Lungenerkrankungen bei Kindern jeweils um ein Viertel beziehungsweise ein Drittel Standardabweichung ab. Drittens, sparen Haushalte 2-3% ihrer Monatlichen Barauslagen. Ausserdem zeigt unsere Analyse, dass niedrigere Transaktionskosten die Nachfrage zum Marktpreis von US \$9 von 19% auf 44% erhöhen

konnte, dass aber Subventionen, von über 55% nötig waren, um die Nachfrage auf 70% zu erhöhen. Wir finden keine Effekte der Solarlichter auf die Schulnoten von Kindern. Wir schliessen das zweite Kapitel mit der Empfehlung ab, dass Umwelteffekte - kombiniert mit der hohen Preiselastizität der Nachfrage und der Tatsache, dass Preisreduktionen die Nutzung nicht beeinträchtigen - Subventionen rechtfertigen.

Die Auswirkungen von Solarlichtern auf ländliche Haushalte und deren Umwelt hängt zu einem grossen Teil davon ab, ob die Lichter auch wirklich genutzt werden. Dies ist, wie das Beispiel von verbesserten Kochöfen zeigt, nicht immer der Fall (Hanna, Dufo & Greenstone, 2016). Die Nutzung von Technologien zu messen kann zur Herausforderung werden, insbesondere, wenn die befragten Personen denken, dass eine starke Nutzung sozial wünschenswert ist. Denn in diesem Fall können Befragte hinsichtlich ihrer Angaben zur Nutzung übertreiben, was zu verzerrten Resultaten führt (social desirability bias). Solche Verzerrungen wurden in verschiedenen Studien über die Verbreitung von neuen Technologien in Entwicklungsländern beobachtet (Wilson et al., 2016; Thomas et al., 2013). Zur Lösung dieser und anderer Messprobleme, nutzen wir Sensoren um die Nutzung der Solarlichter zu messen. Die Sensoren wurden speziell für diese Studie von einem Team von Ingenieuren entwickelt.

Das dritte Kapitel 3, das zusammen mit I. Günther und Y. Borofsky verfasst wurde, befasst sich mit der Information, die wir mit Hilfe der Sensoren gesammelt haben. Im speziellen geht es darum, die Nutzung von Solarlichtern objektiv zu messen und mit den Resultaten der Haushalts-/Personenbefragungen zu vergleichen. Damit können wir analysieren inwiefern die Befragungsdaten systematischen oder auch zufälligen Messfehlern unterliegen und welche Art von Fragen zu genaueren Antworten führen. Die Sensordaten zeigen, dass Haushalte die Solarlichter im Durchschnitt vier Stunden täglich nutzen, vor allem in den Morgen- und Abendstunden. Zudem beobachten wir, dass die Schätzung der Nutzung durch die befragten Personen im Durchschnitt zwar sehr ähnlich zu der durch die Sensormessungen erfolgten Schätzung der Nutzung ist. Die Korrelation der Sensoren- und Befragungsmessung auf der individuellen Haushaltsebene ist aber sehr klein, was davon zeugt, dass grosse zufällige Messfehler auftreten. Unsere Resultate zeigen, dass Haushalte, welche die Solarlichter nur selten nutzen, eher übertriebene Angaben zur Nutzung machen, während Haushalte, welche die Lichter wenig nutzen eher untertreiben. Wie es der Hawthorne-Effekt vorher sagt, steigt die Nutzung der Solarlichter umso mehr je öfter die Interviewer die Haushalte besuchen. Dieser Effekt flacht über Zeit aber ab. Da kostengün-

stige Solarlichter und Sensoren relativ neu sind, legt diese Dissertation die erste Studie vor, die Sensoren in einer grossen Anzahl von Haushalten anwendet um die Nutzung von Solarlichtern zu untersuchen und diese mit Befragungsdaten zu vergleichen.

Ein weiteres zentrales Ergebnis des zweiten Kapitels ist, dass Emissionsreduktionen in gewissen Kontexten Subventionen rechtfertigen können. Subventionen können allerdings komplexe, und zum Teil widersprüchliche Effekte auf Kauf und Nutzung von Solarlichtern haben. Deswegen diskutieren wir im vierten Kapitel die direkten und indirekten Effekte von Subventionen. Zunächst zeigen wir, wie Subventionen die Nutzung beeinflussen. Preisreduktionen können die Nutzung verringern, wenn tiefere Preise dazu führen, dass Käuferinnen und Käufer das Produkt weniger wertschätzen (Sunk-Cost Effekte), oder, dass Haushalte das Produkt kaufen, obwohl sie es nicht wirklich benötigen (Selektionseffekte). Eine der indirekten Auswirkungen von Subventionen sind soziale Interaktionseffekte. Soziale Interaktion kann die Einführung eines neuen Produktes beeinflussen, wenn Leute voneinander lernen oder einander imitieren. Wir beobachten, dass Subventionen die Nachfrage stark vergrössern ohne die Nutzung zu verringern, finden also keine Evidenz für Sunk-Cost- oder Selektionseffekte. Unsere Resultate deuten auch an, dass soziale Interaktion die Preissensitivität der Nachfrage steigert, wobei die Nachfrage derjenigen Haushalte steigt, denen ein Solarlicht zu einem niedrigen Preis angeboten wurde und wenn sie eine hohes Preisangebot bekamen. Dieses Ergebnis suggeriert erstens, dass soziales Lernen wahrscheinlicher ist als Imitation, da wir im letzteren Fall erwarten würden, dass die Nachfrage bei allen Preisen steigt. Zweitens scheint es, dass soziale Interaktionseffekte Subventionen komplementieren und die Nachfrage nicht alleine erhöhen können. Zusammenfassend finden wir, dass in unserem Kontext Solarlichter viel genutzt werden und die Nutzung von Kerosin substantiell senken. Sie reduzieren wärmende Emissionen zu geringen Kosten und bringen ruralen Haushalten günstigeres und besseres Licht. Zudem zeigen unsere Resultate, dass weiter Preisreduktionen nötig sind, um die Übernahmerate auf über 50% zu steigern und, dass Subventionen die Nutzung nicht beeinträchtigen. Zusammengenommen legen diese Ergebnisse nahe, dass Subventionen für netzferne Solarlichter in gewissen Settings gerechtfertigt werden können.